

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Návrh stykače nízkého napětí
Proposal for low – voltage contactor

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jiří Čmíel

Studijní program:

N2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907T001 Elektroenergetika

Téma:

Návrh stakače nn
Proposal for low - voltage contactor

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Navrhněte stykač na jmenovité parametry : $U = 500 \text{ V}$, $I_n = 160 \text{ A}$, $I_d = 2000 \text{ A}$, pro kategorii použití AC3.
2. Rozeberte konstrukční provedení stykačů nn a vliv kategorie použití na jejich návrh.
3. V rámci návrhu realizujte výpočet proudovodné dráhy, včetně kontroly na dynamické a tepelné namáhání.
4. Proveďte rámcový výpočet mechanismu stykače.
5. Proveďte diskuzi výsledků.

Seznam doporučené odborné literatury:


Havelka : Stavba elektrických přístrojů I, VUT Brno 1985
Král, Vaněk : Elektromagnetické přístroje, VUT Brno 1983
Příslušné EN a ČSN

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

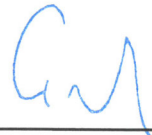
Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Hytka, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2016

Datum odevzdání: 28.04.2017


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

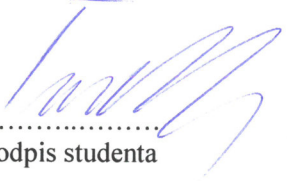



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 25.4 2017


.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Zdeňku Hytkovi, CSc. za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Anotace

Tato práce řeší návrh stykače nízkého napětí. Teoretická část diplomové práce se zabývá problematikou návrhu proudovodné dráhy, výpočtem působení elektrodynamických sil a kontrolou oteplení proudovodné dráhy. V závěru teoretické části je rámcově rozebrán návrh elektromagnetu a pohybového ústrojí kontaktního můstku. Dále je pak v praktické části proveden výpočet stykače nízkého napětí.

Klíčová slova

Stykač, kategorie užití, vzdušná vzdálenost, povrchová cesta, proudovodná dráha, elektrodynamické síly, oteplení, elektromagnet,

Abstract

The work deals with a design of a low voltage contactor. The theoretical part of the thesis deals with the design of the current path, calculating of the impact of electrodynamic forces, and control of current path warming. At the end of the theoretical part, a general analysis of the electromagnet design and the motion system of the contact bridge is proposed. Furthermore, the practical part contains a calculation of the low voltage contactor.

Key words

Contactor, utilization category, circle distance, creepage, current path, electrodynamic forces, warming, electromagnet

Obsah

1	Úvod do problematiky stykačů.....	1
1.1	Základní vlastnosti a použití stykačů	1
1.2	Kategorie užití stykačů	3
1.3	Druhy provozu spínacích přístrojů	4
2	Izolace elektrických přístrojů nízkého napětí.....	6
2.1	Izolační vzdálenosti	6
2.2	Napětíové zkoušky	6
2.3	Vzdušné vzdálenosti a povrchové cesty u přístrojů nn.....	6
3	Proudovodná dráha.....	9
3.1	Průřez proudovodné dráhy	9
3.2	Tvar proudového vodiče.....	9
3.3	Kontakty	10
3.4	Silové účinky elektrického proudu.....	12
3.4.1	Vznik elektrodynamických sil	12
3.4.2	Síla mezi rovnoměrně uspořádanými vodiči	13
3.4.3	Síly mezi vodiči omezené délky	14
3.4.4	Síly mezi vodiči konečného průřezu	14
3.5	Síly mezi vodiči v úhlu.....	15
3.5.1	Obecné případy sil vodičů v úhlu	15
3.5.2	Síly v trojfázové soustavě.....	17
4	Pružiny	18
4.1	Pružiny obecně	18
4.1.1	Základní rozdělení pružin.....	18
4.2	Pružná síla pružiny	18
4.3	Přímočarý pohyb tělesa při přímo působící síle	21
4.4	Vyvolaný pohyb pružinou	21
4.5	Pohyb při obecně proměnné síle.....	23
5	Oteplení přístrojů.....	25
5.1	Základní oteplovací jevy a vztahy	25
5.1.1	Oteplování proudovodiče	25
5.1.2	Oteplení proudovodiče při přerušovaném chodu.....	26
5.1.3	Krátkodobé oteplení	26
5.2	Tepelné pole	28
5.2.1	Základní zákony tepelného toku.....	28

5.2.2	Chladivost povrchu.....	29
5.2.3	Měrná chladivost povrchu sáláním.....	30
5.2.4	Měrná chladivost povrchu konvencí.....	31
5.2.5	Chlazení přes uzavřený prostor	34
5.2.6	Oteplení proudovodné dráhy	35
5.3	Náhradní jednořadová tepelná síť.....	36
5.3.1	Prvky jednořadové tepelné sítě.....	37
6	Elektromagnet	38
6.1	Návrh vinutí cívky elektromagnetu	38
6.1.1	Oteplení cívky elektromagnetu.....	39
6.2	Tažná síla jednofázového elektromagnetu	40
6.3	Závit nakrátko.....	41
7	Návrh stykače	43
7.1	Parametry požadovaného stykače.....	43
7.2	Izolace	43
7.2.1	Zatěžovací proudy stykače	44
7.2.2	Návrh proudovodné dráhy	44
7.2.3	Stykový odpor a tlak.....	45
7.3	Výpočet elektrodynamických sil	46
7.4	Přítlačné pružiny kontaktního můstku	50
8	Výpočet oteplení jmenovitým proudem	52
8.1	Výpočet odporu jednotlivých částí proudovodné dráhy.....	52
8.1.1	Vypočet přítlačné síly šroubového spoje.....	54
8.1.2	Výpočet náhradního schématu přivodu proudu.....	55
8.1.3	Náhradní schéma svorkového spoje	58
8.1.4	Výpočet náhradního schématu přívodního pásku.....	58
8.1.5	Náhradní schéma hlavního kontaktu	63
8.1.6	Náhradní schéma kontaktního můstku	64
8.1.7	Krátkodobé oteplení	71
8.2	Vypínací pružiny	73
8.3	Sestavení průběhu neaktivních odporů.....	74
9	Návrh elektromagnetu	76
9.1	Určení potřebného tahu elektromagnetu.....	76
9.2	Návrh železného jádra a vinutí cívky	77
9.2.1	Oteplení cívky elektromagnetu.....	80

9.2.2	Závit nakrátko.....	82
9.3	Dynamika stykače	84
9.3.1	Zapínací doba a rychlost.....	84
9.3.2	Rychlost a doba vypínacího pochodu.....	85
10	Zhodnocení výsledku	86

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
A	J	Mechanická energie
a	m	Vzdálenost
a'	$m \cdot s^{-1}$	Zrychlení
B	T	Elektromagnetická indukce
B _δ	T	Indukce ve vzduchové mezeře
C _k	-	Činitel změny odporu úžiny
c	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	Měrná tepelná kapacita
d'	m	Průměr drátu
D _i	m	Idealizovaný průměr proudové úžiny
D _s	m	Střední průměr pružiny
E _z	-	Emisivita materiálu
E _{z12}	-	Vzájemná emisivita
F	N	Síla
f	Hz	Frekvence
F _E	N	Působící síla na kontaktní můstek
F _k	N	Přítlačná síla
F _o	N	Maximální síla pružiny
F _u	N	Síla v kontaktní úžině
F _δ	N	Síla ve vzduchové mezeře
h	m	Šířka
H	Pa	Tvrdost materiálu
I	A	Proud
I _e	A	Ekvivalentní proud
I _k	A	Zkratový proud
I _n	A	Jmenovitý proud
k	-	Materiálová konstanta
k _b	-	Bezpečnostní činitel
K _{Fe}	-	Činitel plnění železa
k _h , k _b	-	Opravní činitelé
k _s	-	Vliv povrchového jevu
l	m	Délka
L	H	Indukčnost
l _{fe}	m	Střední délka magnetického toku
L _g	m	Stlačená délka pružiny
L _o	m	Délka pružiny ve volném stavu
m	kg	Hmotnost
n	-	Druh styku
n'	-	Počet závitů
O	m	Obvod
P	m^2	Povrch
P _{fmax}	W	Skutečné ztráty v železe
P _{fskut}	W	Skutečné dovolené ztráty

P_k	m^2	Povrch konvence tělesa
P_z	m^2	Povrch zářícího tělesa
Q	W	Tepelný tok
R	Ω	Odpor
r	m	Poloměr
R_s	Ω	Stykový odpor
R_T	$K \cdot W^{-1}$	Tepelný odbor tělesa
R_{tl}	$K \cdot W^{-1}$	Podélný tepelný odpor
R_{Ti}	$K \cdot W^{-1}$	Příčný tepelný odpor
S	m^2	Průřez
s	m	Stoupání závitů
t	s	Čas
T	K	Termodynamická teplota
t_k	s	Doba krátkodobého oteplení
T_k	$^{\circ}C$	Dovolená teplota materiálu
T_o	$^{\circ}C$	Teplota okolí
T_s	$^{\circ}C$	Střední teplota
t_x	s	Čas po dráze
U_i	V	Izolační napětí
U_k	V	Napětí na krátko
U_n	V	Jmenovité napětí
U_r	V	Obnovené napětí
U_{sm}	V	Úbytek napětí při měknutí
U_{ss}	V	Úbytek napětí při svaření
V	m^3	Objem
v	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost
v_s	$m \cdot s^{-1}$	Střední rychlost po dráze
v_x	$m \cdot s^{-1}$	Rychlost na konci dráhy
W_e	J	Energie dodaná zdrojem
W_j	J	Energie měnící se v teplo vlivem ztrát
W_m	J	Přírůstek magnetické energie
x	m	Dráha
α	K^{-1}	Teplotní součinitel odporu
α_k	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$	Odvod tepla konvencí
α_o	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$	Činitel měrné chladiivosti
α_{on}	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$	Náhradní teplotní součinitel
α_z	$W \cdot m^{-2} K^{-1}$	Odvod tepla zářením
δ	m	Vzdálenost stěn
θ	K	Oteplení
θ_{∞}	K	Oteplení konce příčné větve
θ_k	s	Oteplení za dobu krátkodobého oteplení
θ_m	K	Maximální oteplení
θ_n	K	Jmenovité oteplení tělesa
θ_p	K	Oteplení povrchu
λ	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Vodivost prostředí
λ_{efv}	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	Efektivní vodivost vzduchu

M	-	Pracovní režim pružiny
μ_0	$H \cdot m^{-1}$	Permitivita vakua
μ_r	-	Relativní permitivita materiálu
ρ	$\Omega \cdot m$	Rezistivita
ρ_{40}	$\Omega \cdot m$	Rezistivita při 40 °C
σ	$A \cdot m^{-1}$	Proudová hustota
σ_{pt}	Pa	Pevnost materiálu v tahu
τ	-	Časová konstanta
τ_d	Pa	Namáhání ve smyku
φ	-	Korekční činitel
Φ	Wb	Střídavý magnetický tok
Ω	$rad \cdot s^{-1}$	Úhlová frekvence
Δt	s	Nárůst záběrného proudu
Δt_z	s	Doba pohybu kotvy

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
Obr.	Obrázek
Min.	Minimální
Max.	Maximální
Tab.	Tabulka
str.	strana
kap.	kapitola
č.	číslo
skut.	skutečný

Seznam Ilustrací

Obrázek 2.1	Členění polohy	7
Obrázek 2.2	Prodloužení povrchové cesty žebrem	8
Obrázek 3.1	Vzdálenost dvou rovnoběžných vodičů	9
Obrázek 3.2	Síla působící na proudové vlákno v magnetickém poli	12
Obrázek 3.3	Rovnoběžné vodiče	13
Obrázek 3.4	Působení sil na nespojitě vodiče v úhlu	15
Obrázek 3.5	Vodič v pravoúhlém záhybu	15
Obrázek 3.6	Průběh elektrodynamické síly u vodičů umístěných v rovině	17
Obrázek 4.1	Nenapjatý stav pružiny	19
Obrázek 4.2	Prodloužení pružiny o d	19
Obrázek 4.3	Stlačení pružiny o d	19
Obrázek 4.4	Působení síly lineární pružiny změnou její délky	22
Obrázek 4.5	Tahová charakteristika elektromagnetu s odporovou charakteristikou pružin	23
Obrázek 4.6	Výsledný průběh síly na dráze celkové dráze l	23
Obrázek 5.1	Průběh oteplení pro jednotlivé chody	26
Obrázek 5.2	Teplotní spád v tělese	28
Obrázek 5.3	Tvar povrchu tělesa s vyznačením sálání	30
Obrázek 5.4	Příklady sálání mezi rozdílnými emisivitami a teplotami	31
Obrázek 5.5	Svislé chlazení stěny konvencí	32
Obrázek 5.6	Vodorovné chlazení konvencí	33
Obrázek 5.7	Rozhraní vzduchových mezivrstev	36
Obrázek 5.8	Náhradní schéma tyče beze ztrát	37
Obrázek 5.9	Náhradní schéma tyče se ztrátami	37
Obrázek 7.1	Návrh izolačních vzdáleností proudovodné dráhy	43
Obrázek 7.2	Návrh proudovodné dráhy stykače	44
Obrázek 7.3	Detail poloroviny kontaktního můstku	46
Obrázek 7.4	Rovnoběžné úseky proudovodné dráhy	46
Obrázek 7.5	Rovnoběžné úseky proudovodné dráhy	47
Obrázek 7.6	Detail kontaktního můstku	48
Obrázek 7.7	Nespojitě úseky proudovodné dráhy	48
Obrázek 7.8	Pracovní diagram kontaktní pružiny	50

Obrázek 8.1	Rozměry kontaktního můstku	52
Obrázek 8.2	Přívodní pásek stykače	53
Obrázek 8.3	Znázornění chladicího obvodu svazkového vodiče	55
Obrázek 8.4	Náhradní schéma přívodního vodiče	58
Obrázek 8.5	Náhradní schéma svorkového spoje	58
Obrázek 8.6	První část pásku umístěna vně stykače	59
Obrázek 8.7	Náhradní schéma π -článku proudovodné dráhy umístěné vně stykače	60
Obrázek 8.8	Druhá část pásku umístěna uvnitř stykače	61
Obrázek 8.9	Náhradní schéma π -článku proudovodné dráhy umístěné uvnitř stykače	63
Obrázek 8.10	Náhradní schéma podélného odporu kontaktního můstku	64
Obrázek 8.11	Vyobrazení dráhy od kontaktního můstku k bakelitové stěně	64
Obrázek 8.12	Sestavený nepravidelný jehlan	65
Obrázek 8.13	Idealizovaný jehlan	65
Obrázek 8.14	Znázornění chladicího povrchu kontaktního můstku	67
Obrázek 8.15	Náhradní schéma π -článku kontaktního můstku	68
Obrázek 8.16	Celkové náhradní tepelné schéma	68
Obrázek 8.17	Přepočtené náhradní tepelné schéma	71
Obrázek 8.18	Diagram vypínací pružiny	73
Obrázek 8.19	Diagramy kontaktních pružin	75
Obrázek 8.20	Sestavené pracovní diagramy vypínacích pružin	75
Obrázek 8.21	Celkový pracovní diagram pružin	75
Obrázek 9.1	Navržené rozměry plechu elektromagnetu	78
Obrázek 9.2	Návrh cívky elektromagnetu	79
Obrázek 9.2	Závit nakrátko při stínění pólu 60 %	85
Graf 8.1	Součinitele přestupu tepla z izolace do okolního vzduchu pro $d_i = 16 \text{ mm}$	56
Graf 8.2	Vynesení dovoleného proudového zatížení proudovodné dráhy	72
Graf 9.1	Statická charakteristika elektromagnetu s pracovním diagramem pružin	77

Seznam tabulek

Tabulka 1.1	Jmenovité pracovní napětí pro nízkonapěťovou síť	2
Tabulka 1.2	Jmenovité izolační napětí	2
Tabulka 1.3	Třídy kategorie užití	3
Tabulka 1.4	Podmínky pro jednotlivé třídy kategorie užití	4
Tabulka 2.1	Velikost napětí pro jednotlivý druh zkoušek	6
Tabulka 2.2	Minimální vzdušné vzdálenosti a povrchové cesty	7
Tabulka 3.1	Hodnoty materiálové konstanty pro kombinaci materiálu	11
Tabulka 5.1	Maximální teploty materiálu	27
Tabulka 5.2	Hodnoty relativního činitele sálání	30
Tabulka 5.3	Měrná chladivost konvencí dle chlazeného útvaru	32
Tabulka 5.4	Základní linearizované vztahy pro měrnou chladivost zářením a konvencí	33
Tabulka 7.1	Zadané parametry stykače	43
Tabulka 7.2	Parametry dílčích úseků kontaktního můstku	46
Tabulka 7.3	Parametry dílčích úseků kontaktního můstku	47
Tabulka 7.4	Parametry dílčích úseků kontaktního můstku	49
Tabulka 7.5	Vypočtené elektrodynamické síly v proudové dráze	50
Tabulka 9.1	Vypočtené parametry statické charakteristiky elektromagnetu	76
Tabulka 9.2	Numerický výpočet času Δt_2	81
Tabulka 9.3	Tabulka pro výpočet zapínací rychlosti	84
Tabulka 9.4	Tabulka pro výpočet vypínacího času	85

1 Úvod do problematiky stykačů

1.1 Základní vlastnosti a použití stykačů

Stykače v elektrickém obvodu slouží k častému spínání provozních proudů elektrických spotřebičů, kde počet sepnutí stykače dosahuje až 3000 sepnutí za hodinu. Stykače musí spínat a rozepínat hodnoty proudu, které přesahují provozní proudy, a to až 10-ti násobek jmenovitého proudu. Stykač je spínán buď na povel obsluhy, řídícího ústrojí, působením samočinného jisticího relé nebo hlídače. [1]

Stykače jsou konstruovány s vysokou periodou spínání a rozepínání elektrického obvodu. Na základě toho požadavku, jsou na konstrukci stykače kladeny vysoké požadavky, především na jeho trvanlivost, vyjádřenou počtem zapnutí – vypnutí. [1]

Při konstrukci stykače musíme uvažovat s provozním přetížením jako například rozjezd asynchronního motoru nebo jeho trvalé přetížení. Stykače nelze používat pro vypínání zkratových proudů. Proto musí být do série se stykačem vřazeny pojistky. [1]

Další vlastnost stykačů je vytváření stykačových kombinací, od zcela jednoduchých například rozjezd asynchronního motoru hvězda trojúhelník až po kombinaci několika desítek stykačů a pomocných relé. [1]

Rozdělení stykačů

Podle druhu vedeného proudu

- Stejnosměrné
- Střídavé

Podle přídržné síly

- Elektromagnetické
- Váčkové
- Pneumatické

Podle druhu přerušení proudu

- Vzduchové
- Olejové
- Vakuové

Základní veličiny

Jmenovité pracovní napětí

Jmenovité pracovní napětí elektrického zařízení je stanovená hodnota napětí, která zároveň spolu se jmenovitým pracovním proudem určuje použití zařízení. Pro jednopólová zařízení je hodnota jmenovitého pracovního napětí stanovena napětím na pólu. U zařízení, které je klasifikováno jako vícepólové je jmenovité pracovní napětí stanoveno mezi fázemi. [2]

Tabulka 1.1 Jmenovité pracovní napětí pro nízkonapěťovou síť [5]

Stejnoseměrná síť [V]	Střídavá síť 50 Hz [V]	
	Jednofázová	Třífázová
110	-	
220	230	230/400
440	-	400/660
-	-	1000

Jmenovité izolační napětí

Hodnota napětí, na které se vztahují povrchové cesty a elektrické pevnosti. V žádném případě nesmí být hodnota jmenovitého pracovního napětí vyšší než jmenovitá hodnota izolačního napětí. [2]

Tabulka 1.2 Jmenovité izolační napětí

Jmenovité izolační napětí U_i [Vef]	Střídavé zkušební napětí [V _{ef}]
$U_i \leq 60$	1000
$60 < U_i \leq 300$	1500
$300 < U_i \leq 690$	1890
$690 < U_i \leq 800$	2000
$800 < U_i \leq 1000$	2200
$1000 < U_i \leq 1200$	-

Jmenovité impulzní výdržné napětí

Schopnost zařízení vydržet bez poruchy (za stanovených podmínek) vrcholovou hodnotu napěťového impulsu předepsaného tvaru a polarity. Hodnoty jmenovitého impulzního napětí se vztahují ke vzdušným vzdálenostem. [2]

Jmenovitý proud

Hodnota proudu protékající elektrickým přístrojem (obvodem), kde při daném provozu nedojde vlivem hodnoty protékajícího proudu k překročení dovoleného oteplení. [3]

Ekvivalentní zkratový tepelný proud

Za dobu trvání zkratového proudu je vyvinuto množství tepla. Vyvinuté teplo je přepočteno na hodnotu, která odpovídá hodnotě zkratového proudu, tudíž je tento proud považován za fiktivní. Na hodnotu daného fiktivního proudu musí být dimenzována veškerá elektrická zařízení v soustavě. [3]

Zkratový proud

Zkrat v obvodu nebo ve spínacích přístrojích je nežádoucí stav. Zkrat je definován jako vodivé spojení živých částí nebo živé části se zemí v elektrizační soustavě s uzemněným uzlem. Časový průběh a velikost zkratového proudu závisí na velikosti napětí zdroje, impedanci obvodu a časovém okamžiku vzniku zkratu. V závislosti na okamžiku vzniku zkratového proudu, můžeme zkratový proud rozdělit na souměrný a nesouměrný. [3]

Dynamický proud (nárazový proud)

Udává první půlvlna zkratového proudu a zároveň udává míru mechanického namáhání elektrických zařízení jimiž prochází. [3]

Zapínací proud (spínací schopnost)

Schopnost spínacího přístroje sepnout několikanásobek jmenovitého proudu spínacího přístroje, aniž by došlo k jeho poškození. [3]

Vypínací proud (vypínací schopnost)

Schopnost elektrického přístroje vypnout proud, který prochází kontakty, v okamžiku odtržení kontaktů. Přístroj musí tento vypínací proud vydržet a nesmí dojít k destrukci přístroje. [3]

1.2 Kategorie užití stykačů

Kategorie užití stykačů je třídění provozních podmínek a určují předpokládané použití stykačů.

Tabulka 1.3 Třídy kategorie užití [1]

	Kategorie	Typ aplikace	
AC střídavý proud	AC1	Neinduktivní nebo slabě induktivní zátěže	
	AC2	Spouštěče kroužkových asynchronních motorů	
	AC3	Spouštěče motorů nakrátko, vypínání za chodu	
	AC4	Spouštěče motorů nakrátko, včetně brždění protiproudem, reverzace	
	ACXX	5A – spínání plyných výbojek	5B – Spínání žárovek
	ACXX	6A – spínání transformátorů	6B – spínání kondenzátorových baterií
	ACXX	7B – Spínání motorových zátěží a spotřebičů v domácnosti	7B – Spínání motorových zátěží a spotřebičů v domácnosti
	ACXX	8A – spínání hermeticky zapouzdřených chladících kompresorů manuálním resetováním nadproudové spouště	8B – spínání hermeticky zapouzdřených chladících kompresorů automatickým resetováním nadproudové spouště
	AC53a	Spínání motorů s kotvou na krátko s polovodičovými stykači	
DC stejnosměrný proud	DC1	Neinduktivní nebo slabě induktivní zátěže	
	DC2	Zapínání derivačních motorů, vypínání za chodu	
	DC3	Zapínání derivačních motorů, zarážení, pojíždění	
	DC4	Zapínání sériových motorů, vypínání za chodu	
	DC5	Zapínání sériových motorů, zarážení, pojíždění	

V tabulce 1.4 jsou podle jednotlivých kategorií spínání uvedené násobky jmenovitých proudů, účinníků, časové konstanty a násobky jmenovitých napětí, které musí stykač při své činnosti bezpečně zvládnout. Při návrhu i volbě stykače musí být požadavky na spínací schopnost respektovány. [3]

Tabulka 1.4 Podmínky pro jednotlivé třídy kategorie užití [3]

Kategorie AC	Obvyklá funkce						Příležitostná funkce					
	Zapnutí			Vypnutí			Zapnutí			Vypnutí		
	I	U	cos	I	U _r	cos	I	U	cos	I	U _r	cos
AC 1	I_n	U_n	0,95	I_n	U_n	0,95	-	-	-	-	-	-
AC 2	$2,5I_n$	U_n	0,65	$2,5I_n$	U_n	0,65	$4I_n$	$1,1U_n$	0,65	$4I_n$	$1,1U_n$	0,65
AC 3	$6I_n$	U_n	0,35	I_n	$0,17U_n$	0,35	$10I_n$ $8I_n$	$1,1U_n$	0,35	$8I_n$ $6I_n$	$1,1U_n$	0,35
AC 4	$6I_n$	U_n	0,35	I_n	U_n	0,35	$12I_n$ $10I_n$	$1,1U_n$	0,35	$10I_n$ $8I_n$	$1,1U_n$	0,35
Kategorie DC	I	U	L/R (ms)	I	U _r	L/R (ms)	I	U	L/R (ms)	I	U _r	L/R (ms)
DC 1	I_n	U_n	1	I_n	U_n	1	-	-	-	-	-	-
DC 2	$2,5I_n$	U_n	2	I_n	$0,1U_n$	7,5	$4I_n$	$1,1U_n$	2,5	$4I_n$	$1,1U_n$	2,5
DC 3	$2,5I_n$	U_n	2	$2,5I_n$	U_n	2	$4I_n$	$1,1U_n$	2,5	$4I_n$	$1,1U_n$	2,5
DC 4	$2,5I_n$	U_n	7,5	I_n	$0,3U_n$	10	$4I_n$	$1,1U_n$	15	$4I_n$	$1,1U_n$	15
DC5	$2,5I_n$	U_n	7,5	I_n	U_n	7,5	$4I_n$	$1,1U_n$	15	$4I_n$	$1,1U_n$	15

1.3 Druhy provozu spínacích přístrojů

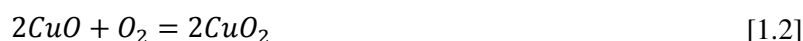
Osmihodinový provoz

Osmihodinový provoz stykače je provoz, kdy kontakty hlavního stykače zůstávají sepnuté, za tuto dobu nesmí dojít k překročení oteplení jednotlivých částí spínacího přístroje. [1]

$$RI^2 = \alpha S \theta + cV \frac{d\theta}{dt} \quad [1.1]$$

Po dobu osmihodinového provozu se neprojeví vliv chemických reakcí mezi vodiči a okolním prostředím. Po určité době, která je delší než osm hodin, se začíná projevovat vliv chemických reakcí a teplota stoupá velmi pozvolna, a to po dobu dnů, týdnů či měsíců. [1]

Mezi stykové plochy měděných kontaktů, na které působí síla F , vniká kyslík z ovzduší a vlivem teploty kontaktů reaguje s materiálem kontaktů



Podle rovnice vzniká chemická reakce, kde dochází ke změně. Kysličník měďný se mění na kysličník měďnatý. Tato chemická reakce má za následek vyšší elektrický odpor a následně roste i teplota styku. Při zvyšování teploty dochází následně ke zvyšování chemické aktivity mědi. V daném okamžiku se změni opět na kysličník měďný



Kyslíčnicková vrstva je podstatně širší. To má za následek přechodně malý pokles teploty, ale se stále rostoucí šířkou vrstvy nám stoupá i teplota. Tento proces může mít za následek zvýšení teploty na takovou úroveň, že může dojít ke zničení. [1]

Nepřetržitý provoz

Podle ČSN EN 60947-1 ed.4 je nepřetržitý provoz definován jako doba, kdy kontakty zařízení zůstávají v sepnuté poloze a vedou ustálený elektrický proud bez přerušení po dobu delší než osm hodin. [2]

Mechanická trvanlivost

Je počet cyklů v chodu na prázdko, které je stykač schopen za dobu své životnosti vydržet, aniž by došlo k poruše. Výrobce k dané třídě stykače určuje i mechanickou trvanlivost. [1]

Elektrická trvanlivost

Elektrická životnost je o třídu menší než trvanlivost mechanická. Je to způsobeno tím, že kontakty jsou při spínání a rozepínání elektrického obvodu opalovány a postupně degradovány elektrickým obloukem. [1]

2 Izolace elektrických přístrojů nízkého napětí

2.1 Izolační vzdálenosti

Izolační vzdálenosti elektrických přístrojů určují jejich rozměr. Izolační vzdálenosti živých částí jsou úměrné jmenovitému provoznímu napětí. U spínacích přístrojů, jsou brány v úvahu všechny druhy mezního namáhání izolačního prostředí elektrickým polem. [4]

Namáhání plynové

Nejčastěji ve vzduchu, kde podél izolace povrchu pevných dílců nastává přeskok nebo může nastat průraz, který nejčastěji vzniká mezi proudovodičem a zemí nebo také v doskokové dráze kontaktů mezi sousedními fázemi. [4]

Namáhání kapalinové

Nejčastěji v oleji, kde dochází k průrazu mezi kontakty nebo mezi proudovými dílci a zemí. [4]

Namáhání pevných izolantů

Jedná se o trvalé narušení izolačního dílce a následně dochází k průrazu. [4]

2.2 Napět'ové zkoušky

Napět'ové zkoušky určují bezpečnou izolační vzdálenost. Zkoušky jsou dvojího typu. První je zkouška střídavým napětím o kmitočtu 50 Hz. Druhým typem je zkouška rázovou vlnou 1,2/50 μ s. [4]

Tabulka 2.1 Velikost napětí pro jednotlivý druh zkoušek [4]

Jmenovité napětí sítě [kV _{ef}]	0,4	0,5	10	22	35	110
Jmenovité napětí spínače [kV _{ef}]	0,4	0,55	12	25	38	123
Napětí střídavé zkoušky [kV _{ef}]	2	2,5	35	55	80	230
Napětí rázové zkoušky [kV _{max}]	-	-	75	180	550	1550
Napětí rázové zkoušky pro odpojovací dráhu [kV _{max}]	-	-	95	150	1210	1680

2.3 Vzdušné vzdálenosti a povrchové cesty u přístrojů nn

Vzdušné vzdálenosti a povrchové cesty u elektrických přístrojů určují minimální hodnoty vzdálenosti. Vzdušná vzdálenost určuje nejkratší cestu vzduchem mezi dvěma živými částmi, kde může nastat přeskok. U povrchové cesty se uvažuje nejkratší cesta mezi dvěma živými částmi po povrchu izolantu nebo spárou mezi dvěma izolačními částmi. [4]

Tabulka 2.2 Minimální vzdušné vzdálenosti a povrchové cesty [4]

Druh napětí		B			C			D		
DC [V]	AC [V]	Povrchová cesta		Vzduš. vzdál.	Povrchová cesta		Vzduš. vzdál.	Povrchová cesta		Vzduš. vzdál.
		a	b		a	b		A	B	
440	400	3	4	3	4	6	4	6	10	6
600	500	4	6	4	6	10	6	10	14	8
-	660	5	8	5	8	12	7	12	17	9

Při stanovení konkrétní vzdálenosti dvou kovových dílů s různým potenciálem musíme uvažovat vliv napětí, prostředí, polohy a konstrukce. [4]

Vliv napětí

Na elektrické přístroje, které jsou konstruovány pro nízké napětí, se zvyšuje hodnota jmenovitého napětí o 10 %. Navýšení napětí je z důvodu kolísajícího napětí sítě. Hodnota se udává jako jmenovitá hodnota spínacího přístroje. Hodnoty pro ostatní hladiny napětí se jsou uvedeny v tabulce 2.1. [4]

Vliv stupně znečištění (stav okolního prostředí)

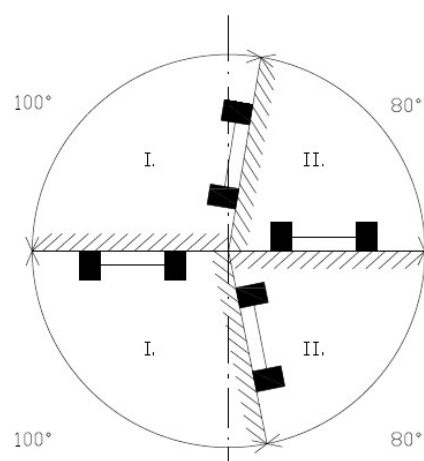
Smluvené číslo vyjadřující množství vodivých nebo hydrofobických částic prachu, ionizovaných plynů nebo solí, relativní vlhkosti a četnosti jejich výskytu, které má za následek hydrofobickou absorpci nebo kondenzaci vlhkosti, které povedou ke snížení elektrické pevnosti nebo měrného povrchového odporu. [4]

Podmínkami dané okolním prostředím je přiřazen stupeň znečištění, pro které je zařízení určeno. Stupně znečištění jsou jedním z hlavních kritérií pro určení vzdušných vzdáleností a povrchových cest.

Vliv polohy

Můžeme rozdělit na visutou a ležatou. Klasifikace poloh je znázorněna na obrázku 2.1.

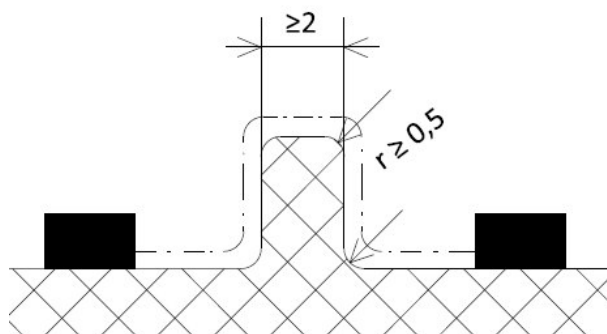
Jak můžeme pozorovat v kvadrantu I. a IV. je dělení poloh v rozmezí $\pm 80^\circ$ od vodorovné osy považováno za polohu ležatou. Za to v kvadrantech II. a III. a ve zbývajících částech kvadrantů I. a IV. svírající úhel $\pm 100^\circ$ je tato poloha považována za visutou. Pokud se jedná o případ, kdy nám zakřivené plochy zasahují do obou poloh, musí se zohlednit, zda dráhy obou poloh jsou stejně dlouhé. Pokud jsou polohy obě stejné, můžeme danou polohu určit jako visutou. [4]



Obrázek 2.1 Členění polohy [4]

Vliv konstrukce

Tvar a konstrukce izolačních částí je předem určen normou. Aby se zamezilo přeskokům mezi živými částmi, doporučuje se prodloužení povrchové cesty. Prodloužení povrchové cesty je realizováno za pomoci žebířek nebo drážek. Minimální šířka paty žebířku je 2 mm. Minimální poloměr zaoblení u hlavy žebířku je 0,5 mm. [4]



V praxi se nejčastěji používají žebířky, takový případ je znázorněn na obrázku 2.2. Prodloužení povrchových cest má zásadní vliv na rozměry konstrukce přístrojů. Pokud jsou žebířky použity k prodloužení povrchových cest z kovových částí bez napětí, musí být jedna z dvou cest dostatečně nebo součet obou cest 1,25ti násobek dostatečné délky. [4]

Obrázek 2.2 Prodloužení povrchové cesty žebířkem [4]

Izolační prvky nesoucí živé části spínacích přístrojů nesmí mít podélné štěrby, ty mají za následek snižování elektrické pevnosti. Dále proudovodné dráhy musí být řádně oještěny. Spáry u izolačních svorníků mají nepříznivý vliv na izolační stav povrchových cest vlivem srážejících vodních par. [4]

3 Proudovodná dráha

3.1 Průřez proudovodné dráhy

Vztah pro výpočet průřezu proudovodné dráhy vychází z hustoty elektrického proudu σ . Kde hustota elektrického proudu je vektorová veličina a má stejnou orientaci jako intenzita elektrického pole E . Velikost hustoty elektrického proudu je rovna procházejícímu proudu dané elementární plošky průřezu vodiče, kde elementární ploška je kolmá ke směru proudu. [7]

Proud procházející celým průřezem je roven

$$I = \int \sigma \cdot dS \quad [3.1]$$

Při konstantním průřezu a proudu vodiče je vztah po integraci roven

$$\sigma = \frac{I}{S} \quad [3.2]$$

Po úpravě předcházejícího vztahu, je možné z proudové hustoty pro daný materiál určit minimální průřez vodiče

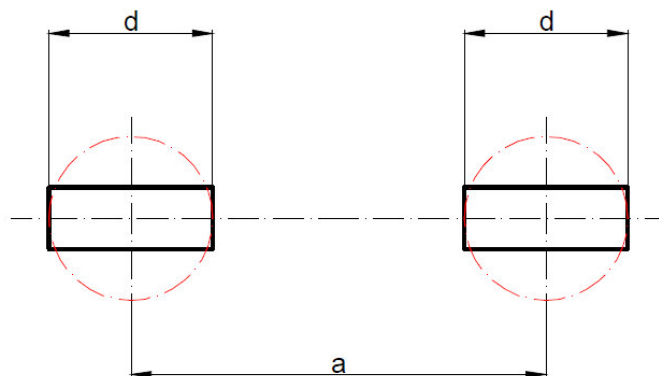
$$S \geq \frac{I}{\sigma} \quad [3.3]$$

3.2 Tvar proudového vodiče

Vodič konstantního průřezu S o délce l má ohmický odpor R dán vztahem

$$R = k_s \rho \frac{l}{S} = k_s \rho_{40} (1 + \alpha \theta) \frac{l}{S} \quad [3.4]$$

Kde k_s znázorňuje vliv povrchového jevu. Pro střídavý proud je povrchový jev menší než 1. U stejnosměrného proudu povrchový jev nevzniká, ale je roven jedné. Vliv povrchového jevu se uvažuje, pokud je jedna polovina rozměrů průřezu vodiče větší nebo se alespoň blíží hloubce vniku. Velikost odporu je ovlivněna teprve tehdy, pokud je vzdálenost středů dvou rovnoběžných vodičů menší než 5-ti násobek rozměrů průřezu vodiče. [6]



Obrázek 3.1 Vzdálenost dvou rovnoběžných vodičů [6]

Hodnoty činitele povrchového jevu se stanovují za pomoci grafu. Pokud se bude současně vyskytovat spolu s povrchovým jevem i jev blízkosti musí se stanovit hodnota opravného činitele. Opravný činitel je dán součinem činitele povrchového a blízkého jevu. [6]

Pro úseky, které jsou zakřivené, se odpor počítá pro délku střední siločáry proudového pole. Při změně nebo měnícím se průřezu dráhy se pro určité typy změn průřezu dají určit pomocí grafů. V ostatních případech se musí určit efektivní průřez podle odhadu průběhu proudového pole. [6]

3.3 Kontakty

Kontakty slouží k propojení nebo přerušení proudové dráhy. V případech, kde slouží kontakty k rozpojování proudové dráhy, vykazují oproti ostatním úsekům rozdílné vlastnosti. Přerušení proudové dráhy se uskutečňuje za různých provozních podmínek, například při průchodu proudu nebo bez průchodu proudu, s velkou četností spínání atd. Z tohoto důvodu se na kontakty kladou značné požadavky. Základní požadavky na kontakty jsou:

- malý stykový odpor,
- velká odolnost proti mechanickému opotřebení,
- velká odolnost proti svaření,
- velká odolnost vůči opalování elektrickým obloukem,
- optimální vliv na vývoj deionizačních pochodů po zhasnutí oblouku. [5]

Kontaktní materiály

Ve většině případů se jako kontaktní materiály používají ryzí kovy, slitiny a spékané kovy. Z ryzích kovů se nejčastěji ve spínací technice používá měď, stříbro a wolfram.

- Měď má dobré kontaktní vlastnosti. Nevýhodou je, že se snadno pokrývá kyslíčkem.
- Stříbro je známo svou vynikající vodivostí. Nevýhodou je celkem malá tvrdost a odolnost proti elektrickému oblouku.
- Wolfram se nejčastěji používá na opalovací kontakty, díky svým vlastnostem jako je vysoká teplota tavení a tvrdost. [5]

Stykový odpor

Přiložíme-li dva kovové vodiče na sebe a působíme na ně určitou silou F_k , může se to považovat za určitý typ styku. Nedochází k dokonalému styku po celé ploše, ale jen v určitém množství mikroskopických plošek. Jedná se tedy o nedokonalý styk, který je dán mikroskopickou nerovností. Do značné míry počet mikroskopických plošek závisí na mechanických vlastnostech materiálu a přitlačné síle F_k . Vytvořením styku za pomoci přitlačné síly, způsobuje v mikroskopických ploškách deformaci a prodloužení přípojníc, to má za následek zmenšení průřezu a dále zvětšení úžinového odporu v místě styku R_s . [5]

Odpor styku R_s je dán vztahem

$$R_s = k \cdot F^{-n} \quad [3.5]$$

Ve vztahu značí k materiálovou konstantu, ta se volí pro daný kov v rozmezí uvedenou v tabulce 3.1. Exponent n charakterizuje druh styku.

Tabulka 3.1 Hodnoty materiálové konstanty pro kombinaci materiálu [6]

Materiál kontaktů	K
Stříbro – Stříbro	$3 \cdot 10^{-4} - 6 \cdot 10^{-4}$
Měď – Měď	$6 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3}$
Hliník – Hliník	$9 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$
Měď – Hliník	$5 \cdot 10^{-3} - 1,5 \cdot 10^{-2}$

Hodnoty dolní meze intervalu uvedené v tabulce 3.1 se používají pro kontakty, kde se předpokládá, že budou v prostředí, v němž dochází k minimální korozi nebo vlivem pohybu kontaktu se čistí. Horní mez intervalu je vyčleněna pro kontakty čelní, občas spínané a nacházející se ve zhoršené atmosféře. [5]

Měknutí kontaktů

Měknutí kontaktů způsobuje napětový úbytek, který je úměrný oteplení styku kontaktů. Vyjadřuje se v závislosti na stykovém odporu jako funkce, nejčastěji nazývaná jako R-U diagram. Stykový odpor se mění s rostoucím úbytkem napětí ve dvou fázích. V první fázi se mění stykový odpor vlivem změny rezistivity materiálu. Ve druhé fázi se mění stykový odpor, vlivem teploty v místě styku při čemž dochází k měknutí materiálu. Změknutím materiálu vlivem tlaku působícím na kontakt dojde k náhlému zvětšení stykové plochy, a to má za následek zmenšení stykového odporu. Napětí, u něhož dochází k měknutí materiálu, se nazývá napětí měknutí. [5]

Výpočet pro bezpečnou provozní velikost stykového odporu

$$R_s = \frac{U_{sm}}{2 \cdot I_n} \quad [3.6]$$

Svaření kontaktů

Když se teplota materiálu zvyšuje až na hodnotu, při níž je materiál v místě styku taven, dochází k další změně struktury styku, což má za následek další zmenšení hodnoty stykového odporu. Při zmenšení teploty v místě styku kontaktů dojde k tomu, že roztavený kov ztuhne a kontakty jsou navzájem pevně svařeny. [5]

Hodnota napětí svaření je velice důležitá veličina na R-U diagramu, při níž dochází ke vzniku svarů. Vznik svarů způsobuje více faktorů, a to vlastnosti materiálů, stykový odpor a v neposlední řadě teplo vytvořené na ploše kontaktů. Svary jsou v provozu vysoce nežádoucí, protože způsobují deformaci kontaktní plochy. Je-li síla zajišťující oddálení kontaktů menší než síla svaření kontaktů, může docházet k narušení bezpečné funkce spínacího přístroje. Ke svaření kontaktů může dojít buď ve statickém nebo dynamickém režimu. [5]

Vztah pro výpočet odporu na mezi svaření R_{ss}

$$R_{ss} = \frac{U_{ss}}{C_k \cdot I_k} \quad [3.7]$$

Kontaktní přítlak F_k

V sepnutém stavu spínacího přístroje musí být dodržen minimální kontaktní přítlak kontaktů. V praxi se používají pružiny, které svou silou působí na kontaktní můstek. Kontaktní přítlak musí být větší než součet minimální přítlačné síly a elektrodynamických sil působící na kontaktní můstek, které vznikají při zkratu. [5]

K zvětšení míry bezpečnosti je zaveden činitel k_b , který je v rozmezí 1,5 až 3.

$$F_k = k_b \cdot F_{kmin} + F_E \quad [3.8]$$

3.4 Silové účinky elektrického proudu

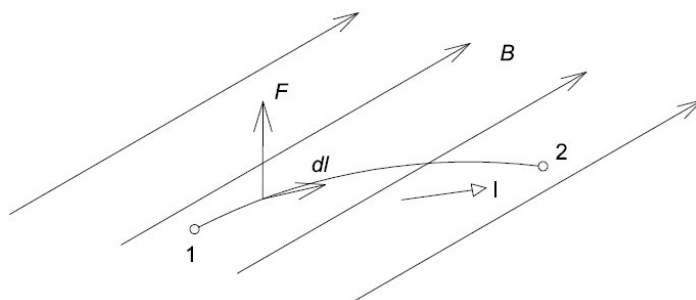
3.4.1 Vznik elektrodynamických sil

V proudové dráze elektrického zařízení, kde prochází proud, vzniká síla, která má za následek mechanické namáhání. Předpokládá se, že mechanické namáhání dosahuje velkých hodnot při zkratech, kdy zkratový proud je několikanásobně větší než proud jmenovitý. Další případ, kdy může docházet k většímu mechanickému namáhání proudové dráhy nebo její části, je tehdy pokud se proudová dráha nebo její část dostane do rezonance s elektrodynamickou silou. Při konstrukci se v určitých případech snaží vzniklé elektrodynamické síly potlačit nebo naopak v některých případech se snažíme elektrodynamické síly vhodnými konstrukčními zásahy zvětšit.

Vznik elektrodynamických sil v elektrických přístrojích je následkem existence a interakce magnetických polí, která na sebe navzájem působí [5]

$$d\mathbf{F} = i d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad [3.9]$$

Kde $d\mathbf{F}$ je působící síla vzniklá vlivem elementu $d\mathbf{l}$ proudového vlákna s proudem i , která se nachází v magnetickém poli indukce \mathbf{B} .



Obrázek 3.2 Síla působící na proudové vlákno magnetickém poli

Vzniklá síla proudového vlákna o délce l

$$d\mathbf{F} = i \int_l d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad [3.10]$$

U elektrických přístrojů vznikají elektrodynamické síly v těchto případech

- u více proudových drah,
- dochází-li k zakřivení proudové dráhy,
- nacházejí-li se proudové dráhy v blízkosti feromagnetického rozhraní,

- dochází-li v proudové dráze k deformaci proudového pole, vlivem změny průřezu proudové dráhy,
- průtokem proudu proudovou dráhou,
- změnou indukčnosti obvodu vyvolané činností elektrického přístroje. [5]

3.4.2 Síla mezi rovnoměrně uspořádanými vodiči

V případě elektrického obvodu platí zákon o zachování energie. Dodáním určité energie v určitém čase musí být energie zachována, a to i za předpokladu, že se změni v jiné formy [4]

$$dW_e = W_j + W_m + dA \quad [3.11]$$

Vztah přepíšeme do elektrických veličin za předpokladu konstantní velikosti proudu $i = I$ dostane vztah podobu [4]

$$UI \cdot dt = RI^2 \cdot dt + \frac{I^2}{2} dL + dA \quad [3.12]$$

Chceme-li stanovit celkovou sílu F , která na daném úseku vodiče působí, musíme uvažovat, že při změně polohy elementu vlivem působící síly o dráhu da se spotřebuje deformační práce $dA = F \cdot da$ [5]

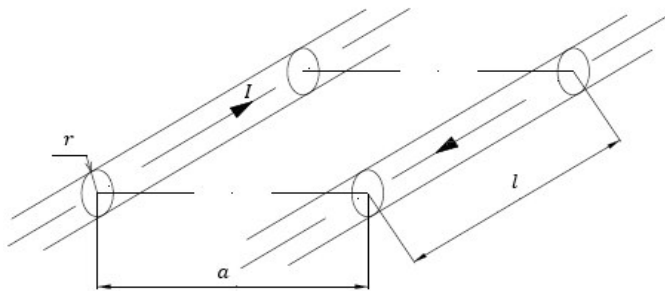
$$dA = F \cdot da = \frac{1}{2} I^2 \cdot dL \quad [3.13]$$

Po úpravě dostáváme vztah

$$F = \frac{1}{2} I^2 \cdot \frac{dL}{da} \quad [3.14]$$

Ze základního vztahu pro výpočet elektrodynamických sil je patrné, že elektrodynamické síly nejsou závislé na indukčnosti, ale pouze na její změně. [4]

Výpočet vlastní indukčnosti nekonečně dlouhých, dvou rovnoběžných vodičů kruhového průřezu o poloměru uvedené na obrázku 3.3. Kde pro případ platí podmínka, že vzdálenost a vodičů je podstatně větší než jejich poloměr. Můžeme aplikovat vztah 3.15. [4]



Obrázek 3.3 Rovnoběžné vodiče

$$L = \frac{\mu_r \mu_o l}{\pi} \ln \frac{a}{r} \quad [3.15]$$

Velikost síly F , která působí na úsek vodiče o vzdálenosti a a délky l , platí pouze pro vlastní proudovou smyčku nebo její část dle 3.16

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \frac{l}{a} I^2 \quad [3.16]$$

Dalším případem, kdy vznikají elektrodynamické síly, je případ dvou samostatných obvodů. Tyto dva samostatné obvody se navzájem svými vlastními magnetickými toky ovlivňují vlivem protékajícího proudu I_1 a I_2 . Vlivem uvedených proudů se působením sil mění vzájemná indukčnost, samoindukčnost zůstává konstantní [4]

$$F_{\infty} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{l}{a} I_1 I_2 \quad [3.17]$$

3.4.3 Síly mezi vodiči omezené délky

$$\begin{aligned} F_{II} &= 10^{-7} I_1 I_2 \left[\sqrt{\left(\frac{p-n}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{p-s}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{m-n}{a}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{m-s}{a}\right)^2 + 1} \right] \\ &= 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{a} \left[\sqrt{(p-n)^2 + a^2} - \sqrt{(p-s)^2 + a^2} - \sqrt{(m-n)^2 + a^2} + \sqrt{(m-s)^2 + a^2} \right] \\ &= 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{a} (l_{AD} - l_{BD} - l_{AC} + l_{BC}) = 10^{-7} I_1 I_2 \frac{\sum l}{a} \end{aligned} \quad [3.18]$$

Vzorec 3.18 vychází z jednotlivých délkových úseků rovnoběžných proudových drah vzhledem k určitému zvolenému počátku. [4]

U vodičů s proudovými dráhami o stejné délce l uspořádaných paralelně

$$F = 2 \cdot 10^{-7} I_1 I_2 \frac{l}{a} k_d \quad [3.19]$$

Doplňkový činitel k_d znázorňuje zmenšení síly vlivem omezení délky l oproti nekonečně dlouhému vodiči. Doplňkový činitel $k_d < 1$.

3.4.4 Síly mezi vodiči konečného průřezu

Elektrodynamická síla vodičů konečných průřezů je ovlivněna rozložením proudnic po ploše průřezů. Jedná-li se o vodiče kruhového nebo mezikruhového průřezu, vliv rozložení proudnic se navzájem vyrovnává. Rozdíl je právě u vodičů čtyřhranných, které jsou uloženy paralelně, a jejich vzdálenost je malá. V tomto případě se elektrodynamická síla mění, kdy výsledná síla může být větší nebo naopak menší. Velikost síly závisí na hlavně na vzájemném uspořádání.

Kde opravný činitel k_p má dvě složky k_h a k_b

$$k_h = \frac{a^2}{h^2} \left[\frac{2h}{a} \tan^{-1} \frac{h}{a} - \ln \left(1 - \frac{h^2}{a^2} \right) \right] \quad [3.20]$$

$$k_b = \frac{a}{b} \left[\left(\frac{a}{b} + 1 \right) \cdot \ln \left(\frac{a}{b} + 1 \right) + \left(\frac{a}{b} - 1 \right) \cdot \ln \left(\frac{a}{b} - 1 \right) - 2 \frac{a}{b} \ln \frac{a}{b} \right] \quad [3.21]$$

Poté vztah pro rovnoběžné vodiče obdélníkového průřezu má tvar

$$F = 2 \cdot 10^{-7} I_1 I_2 \frac{l}{a} k_b \cdot k_h \quad [3.22]$$

Rovněž lze vycházet ze vztahu pro výpočet omezené délky

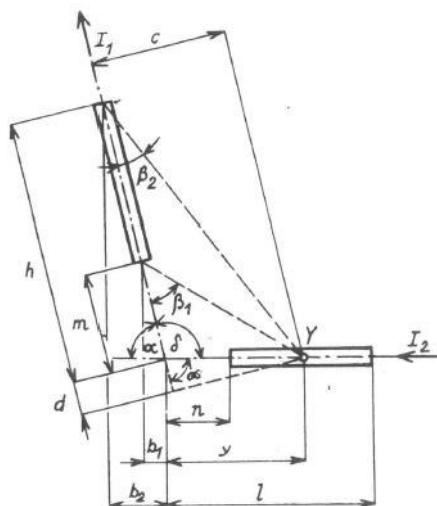
$$F = 2 \cdot 10^{-7} I_1 I_2 \frac{\sum l}{a} k_b \cdot k_h \quad [3.23]$$

3.5 Síly mezi vodiči v úhlu

3.5.1 Obecné případy sil vodičů v úhlu

Jedná-li se o dva přímé vodiče a osy vodičů se protínají pod úhlem δ , tak velikost a působení elektrodynamických sil je dána uspořádáním vodičů a směsem proudů ve vodičích.

Na obrázku 3.4 je znázorněn vodič, který je svírán úhlem δ . U přímých nespojitých vodičů omezené délky je velikost síly F_l a momentu M_l působícím na rameni l , dána vztahy 3.24 a 3.25.



Obrázek 3.4 Působení sil na nespojité vodiče v úhlu [4]

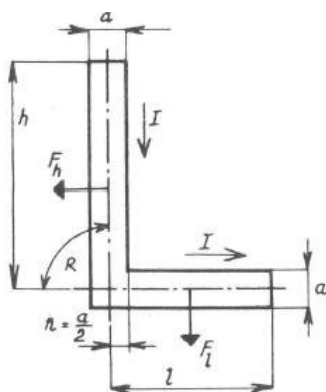
$$F_l = 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{\sin \alpha} \left(\ln \frac{d \cdot r}{b \cdot u} - \cos \ln \frac{c \cdot s}{a \cdot t} \right) \quad [3.24]$$

$$M_l = 10^{-7} I_1 I_2 \left[h \cdot \sin \alpha \cdot \ln \frac{a}{c} + m \cdot \sin \alpha \cdot \ln \frac{t}{s} + \coth \alpha (a - c - s + t) \right] \quad [3.25]$$

Poloha l_m pro působení síly F_l

$$l_m = \frac{M_l}{F_l} \quad [3.26]$$

Spojité pravoúhlý záhyb



Obrázek 3.5 Vodič v pravoúhlém záhybu [4]

Tvar pravoúhlého spojitého záhybu je znázorněn na obrázku 3.5. U pravoúhlého záhybu je dán úhel $\alpha = 90^\circ$ mezi rameny h a l .

Výpočet působící síly F_l a momentu M_l na rameni l

$$F_l = 10^{-7} I^2 \ln \frac{2l}{a} \cdot \frac{h + \sqrt{h^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}}{h + \sqrt{h^2 + l^2}} \quad [3.27]$$

$$M_l = 10^{-7} I^2 h \cdot \ln \frac{l + \sqrt{h^2 + l^2}}{\frac{a}{2} + \sqrt{h^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}} \quad [3.28]$$

Průběžný záhyb

Spojité zalomený záhyb vodiče, kde působící síla F_l a moment M_l na rameni l je roven

$$F_{l(m=0)} = 10^{-7} \frac{I^2}{\sin \alpha} \left(\ln \frac{l \cdot d}{n \cdot b} - \cos \ln \frac{l \cdot c}{n \cdot a} \right) \quad [3.29]$$

$$M_{l(m=0)} = 10^{-7} I^2 \left[h \cdot \sin \alpha \cdot \ln \frac{a}{c} + \coth \alpha (a - c - 2l + 2n) \right] \quad [3.30]$$

Podobnými vztahy určíme sílu $F_{h(n=0)}$ a moment $M_{h(n=0)}$, které působí na rameni h .

Složité pravoúhlé záhyby

U spínacích přístrojů je častým vyskytujícím tvarem dvojitý pravoúhlý záhyb, kde síla F_t je ve středu délky l

$$F_t = 2 \cdot 10^{-7} I^2 \ln \frac{2l}{a} \cdot \frac{h + \sqrt{h^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2}}{h + \sqrt{h^2 + l^2}} \quad [3.31]$$

Pokud se úsek $h_1 = h_2$, pak je výsledná síla dvojnásobná a působí síla F_t je ve středu délky l . Při velikosti úseků $h_1 \neq h_2$ se působení síly F_t se posouvá k delšímu rameni h na proudovodné dráze délky l . [4]

Síly v kontaktní úžině

Prochází-li kontaktní úžinou proud, vzniká v kontaktní úžině mezi kontakty odpudivá elektrodynamická síla F_u .

Kde velikost síly F_u je

$$F_u = 10^{-7} \cdot I^2 \cdot \ln \frac{D_i}{d} \quad [3.32]$$

$$d = \sqrt{\frac{4F_k}{\pi H}} \quad [3.33]$$

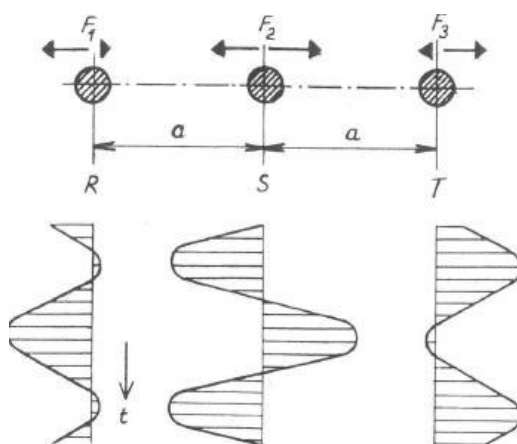
D_i značí průměr idealizované půlkruhové konečné hladiny proudové úžiny a d značí průměr kruhové stykové plochy o určeném kontaktním tlaku F_k a danou tvrdostí materiálu H . [6]

Pokud se jedná o dílec obdélníkového průřezu, tak konečná hladina má tvar půl elipsoidu. A jsou zavedeny osy A a B , kde se výpočet nahrazuje polokoulí s přibližným výpočtem [6]

$$D_i \approx \sqrt{A \cdot B} \quad [3.34]$$

3.5.2 Síly v trojfázové soustavě

U trojfázového systému, kde jsou vodiče v rovině, ve vzdálenosti a , a ve kterých protéká proud I , působí průběh elektrodynamických sil rozdílně v krajním a středovém vodiči. Působící síla kolem středního vodiče, bude kmitat na obě strany stejně, se shodnou amplitudou. Na rozdíl v krajním vodiči bude elektrodynamická síla kmitat převážně na vnější stranu viz. obrázek 3.6. [4]



Obrázek 3.6 Průběh elektrodynamické síly u vodičů umístěných v rovině [4]

$$F_{1,3} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{l}{a} I_{max}^2 \left(\frac{3}{8} \cos 2\omega t + \frac{\sqrt{3}}{8} \sin 2\omega t - \frac{3}{8} \right) \quad [3.35]$$

$$F_2 = 2 \cdot 10^{-7} \frac{l}{a} I_{max}^2 \left(\frac{3}{4} \cos 2\omega t + \frac{\sqrt{3}}{4} \sin 2\omega t \right) \quad [3.36]$$

4 Pružiny

4.1 Pružiny obecně

Pružiny jsou vyrobeny z vysoce pružných materiálů, které jsou schopny měnit, při elastické změně tvaru, mechanickou práci na potenciální energii. Pružiny mají své využití v širokém spektru oborů. Můžou sloužit k akumulaci nebo k zachycení sil, dále pak zabránit přenosu vibrací z jedné části na druhou. V elektrotechnice jsou pružiny nedílnou součástí elektrických přístrojů. Například u stykače se jedna pružina použije k dosažení kontaktního přitlaku a druhá pružina k odtlačení kontaktního můstku od pevných kontaktů, v co nejkratším možném čase.

4.1.1 Základní rozdělení pružin

Dle fyzikálního principu

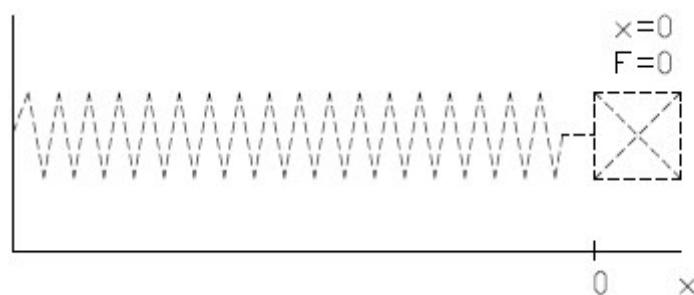
- Mechanické
 - Kovové
 - Nekovové
- Pneumatické
- Hydropneumatické

Dle druhu namáhání

- Pružiny namáhané ohybem
 - Pružnice a svazky pružnic
 - Šroubovitě pružiny zkrutné
 - Spirálovitě pružiny
- Pružiny namáhány krutem
 - Šroubovitě pružiny tlačné
 - Šroubovitě pružiny tažné
 - Šroubovitě pružiny kuželové
 - Torzní tyče
- Pružiny namáhané kombinovaně
 - Talířové pružiny
 - Kroužkové pružiny

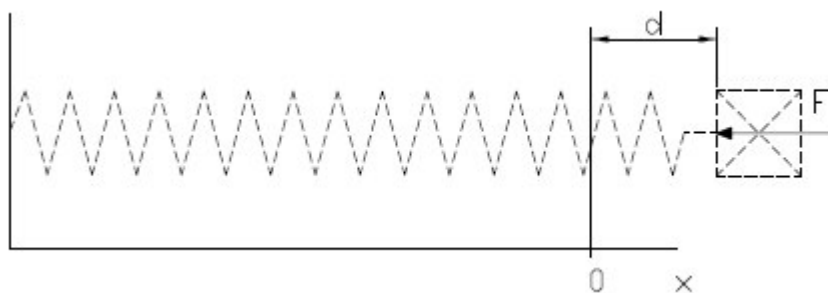
4.2 Pružná síla pružiny

Základní princip pružiny je při stlačení nebo prodloužení pružiny obnovit nenapjatý stav. Nenapjatý stav je takový, kde síla $F = 0$ a prodloužení pružiny $\Delta d = 0$. Názorný příklad na obrázku 4.1. [7]



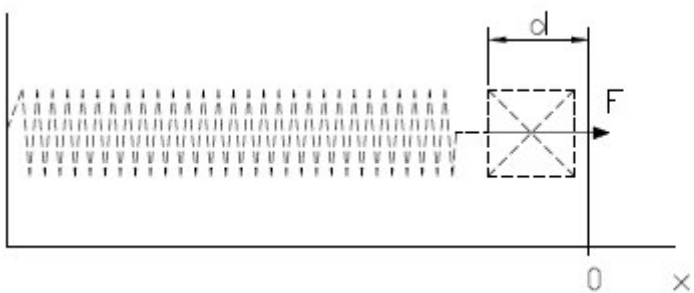
Obrázek 4.1 Nenapjatý stav pružiny [7]

Případ, kdy působíme vnější silou na kostku a dochází k prodloužení pružiny o vzdálenost d a pružina se posune o délku x v kladném směru. Protože se pružina chce vrátit do své rovnovážné polohy, působí síla pružiny F proti směru pohybu kostky, a tak působí v záporném směru, znázorněno na obrázku 4.2. [7]



Obrázek 4.2 Prodloužení pružiny o d [7]

Poslední případ, kdy dochází k zmenšování pružiny o vzdálenost d a to o délku x v záporném směru. Rovněž se pružina chce vrátit do rovnovážné polohy, proto působí síla F v kladném směru, znázorněno na obrázku 4.3. [7]



Obrázek 4.3 Stlačení pružiny o d [7]

V praxi můžeme uvažovat, že vratná síla pružiny F je přímo úměrná jejímu prodloužení. Síla pružiny je dána vztahem

$$F = -k \cdot x \quad [4.1]$$

Ve vztahu znamená znaménko mínus, že síla vyvolaná pružinou má vždy opačný smysl než posunutí jejího volného konce. Konstanta k značí tuhost pružiny a x jeho posunutí. [7]

Výpočtový aparát s postupem pro návrh pružin:

- Zvolíme poměr $A = \frac{D_s'}{d}$ a vypočteme korekční činitele φ

$$\varphi = \frac{A - 0,25}{A - 1} + \frac{0,615}{A} \quad [4.2]$$

- Stanovíme velikost dovoleného namáhání ve smyku τ_D

$$\tau_D = \frac{\sigma_{pt}}{1,6\mu} \quad [4.3]$$

- Vypočteme průměr drátu d' a následně zvolíme normalizovaný průměr drátu d

$$d' = \sqrt{\frac{8P_g A \varphi}{\pi \tau_D}} \quad [4.4]$$

- Vypočteme střední průměr $D_s = A \cdot d$, je-li vypočtená hodnota D_s odlišná od zvolené D_s' , překontrolujeme namáhání ve smyku.

$$\tau_D' = \frac{8P_g D_s \varphi}{\pi d^3} \quad [4.5]$$

Pokud je $\tau_D' > \tau_D$, výpočet opakujeme s vhodněji zvolenými parametry.

- Vypočteme počet aktivních závitů n pro dané stlačení y_g

$$n' = \frac{y_g G d^4}{8P_g D_s^3} \quad [4.6]$$

- Při úplném dotlačení závitů tlačné pružiny nesmí být překročeno krajní dovolené namáhání ve smyku τ_{Dm}

$$\tau_{Dm} = \frac{\sigma_{pt}}{1,6} \quad [4.7]$$

Při stanovení krajních rozměrů tlačné pružiny sčítáme závity aktivní a neaktivní

$$z = n' + n_z \quad [4.8]$$

Při návrhu pružin musíme brát v potaz nerovnosti drátů, proto zvětšujeme dosedovou délku pružin o 8 – 15 %. Zpravidla ji o tuto hodnotu zvětšujeme ještě jednou, abychom zvětšili rezervu vzhledem ke krajnímu namáhání při dosedu závitu. Proto můžeme uvažovat, že za těchto podmínek bude nejkratší montážní délka L_g

$$L_g = (1,08 - 1,15)^2 z d' \quad [4.9]$$

A délka pružiny ve volném stavu

$$L_o = L_g + y_g \quad [4.10]$$

4.3 Přímočarý pohyb tělesa při přímo působící síle

Máme-li těleso o hmotnosti m , na které působí konstantní síla F podél dráhy x je konaná práce, kterou můžeme vyjádřit [4]

$$W = F \cdot x \quad [4.11]$$

Na počátku dráhy je těleso v klidu, nekoná žádnou práci. Těleso se uvede do pohybu působením vnější síly F . Působením vnější síly narůstá rychlost tělesa z nulové hodnoty až na hodnotu v_l na konci dráhy x [4]

$$F \cdot x = \frac{1}{2} m v_l^2 \quad [4.12]$$

Rychlost na konci dráhy vyjádříme úpravou z předcházejícího vzorce

$$v_l = \sqrt{\frac{2Fx}{m}} = \sqrt{2a'x} \quad [4.13]$$

Zrychlení tělesa je dáno druhým Newtonovým zákonem

$$a' = \frac{F}{m} = \textit{kons.} \quad [4.14]$$

Pokud je zrychlení konstantní, tak se jedná o těleso, které má pohyb rovnoměrně zrychlený. U pružinových mechanismů je v našem případě důležitý vztah mezi časem a dráhou a dále mezi časem a rychlostí. [4]

K určení jednotlivých vztahů budeme vycházet ze zrychlení

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m} \quad [4.15]$$

Po úpravě je doba pohybu t_x tělesa po dráze x

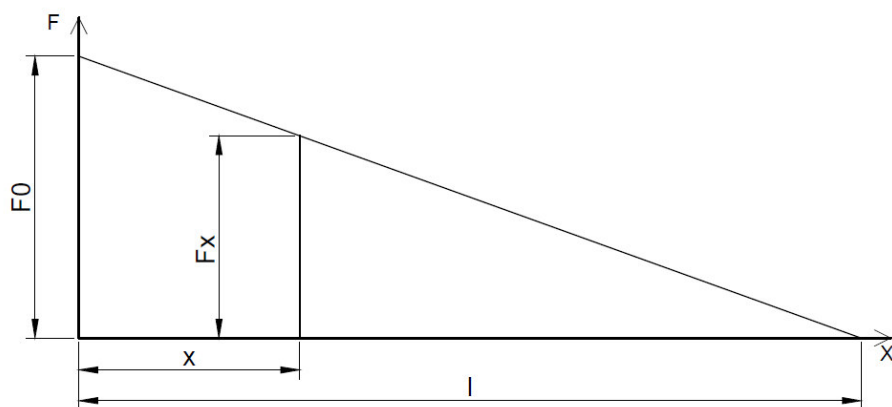
$$t_x = \sqrt{\frac{2mx}{F}} = \sqrt{\frac{2x}{a'}} \quad [4.16]$$

Na dané dráze x střední rychlost tělesa v_s , kde rychlost na konečnou velikost narůstá z nuly na konečnou hodnotu lineárně [4]

$$v_s = \frac{l}{t_l} = \sqrt{\frac{Fx}{2m}} = \sqrt{\frac{a'x}{2}} \quad [4.17]$$

4.4 Vyvolaný pohyb pružinou

Máme-li pružinu s lineární charakteristikou, na kterou působí těleso o hmotnosti m . Síla pružiny F se mění přímo úměrně s rostoucí dráhou pružiny. Předpokládejme, že dráha x bude rovna 0, takže síla F bude maximální pro daný typ pružiny. Průběh síly pružiny je znázorněn na obrázku 4.4. [4]



Obrázek 4.4 Působení síly lineární pružiny změnou její délky [4]

Na obrázku 4.4 je znázorněn průběh lineární pružiny, kde změnu síly F_x v závislosti na délce x k celkové délce pružiny l můžeme vyjádřit pomocí rovnice

$$F_x = F_0 \left(1 - \frac{x}{l}\right) = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad [4.18]$$

Rovnici 4.18 upravíme na diferenciální rovnici nehomogenní a vyjádříme závislosti mezi dráhou, časem a rychlostí. [4]

Diferenciální rovnice má tvar

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{F_0}{lm} = \frac{F_0}{m} \quad [4.19]$$

Matematickými úpravami upravíme diferenciální rovnici do finálního tvaru a dostaneme dobu pohybu t_x tělesa po dráze x

$$t_x = \sqrt{\frac{2mx}{F}} = \sqrt{\frac{2x}{a'}} \quad [4.20]$$

Rychlost na konci dráhy x

$$v_x = \sqrt{\frac{F_0}{m} \left(2x - \frac{x^2}{l}\right)} = \sqrt{a' \left(2x - \frac{x^2}{l}\right)} \quad [4.21]$$

Na dráze x o celkové délce l střední rychlost tělesa v_s

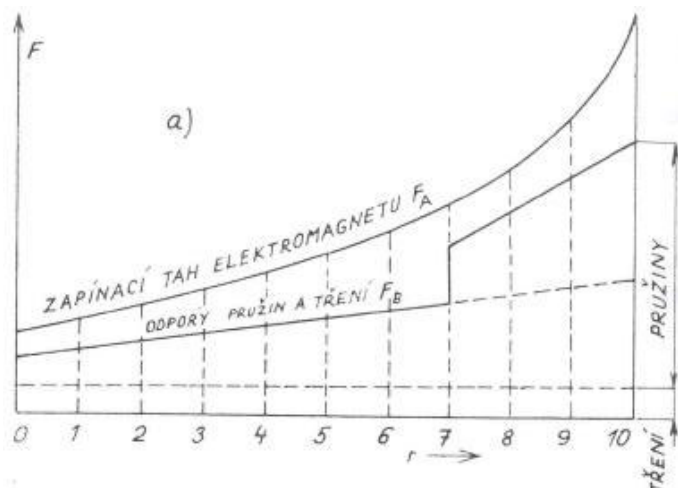
$$v_s = \frac{x}{t} = \frac{x}{\cos^{-1} \left(1 - \frac{x}{l}\right)} \sqrt{\frac{F_0}{lm}} \quad [4.22]$$

Rychlost v_l na konci dráhy, kdy síla je rovna nule

$$v_l = \sqrt{\frac{F_0}{lm}} = \sqrt{a'l} \quad [4.23]$$

4.5 Pohyb při obecně proměnné síle

V oboru spínacích přístrojů je mnoho možností, jak uvést kontaktní můstek do pohybu v požadovaném směru. Z pravidla to mohou být hydraulické, pneumatické, elektromagnetické a pružinové mechanismy nebo jejich kombinace. V praxi se volí druh mechanismu podle požadavku na přítlak kontaktů a odpudivých sil, které musí při přitlaku kontaktního můstku překonat. Síla je velice často charakterizována skokovými změnami. Z toho důvodu je analytické řešení nereálné. V praxi se nevolí ryze matematický postup, ale graficko-početní řešení. [4]



Obrázek 4.5 Tahová charakteristika elektromagnetu s odporovou charakteristikou pružin [4]

Na obrázku 4.5 je znázorněn průběh síly F_A zapínacího elektromagnetu, odpor pružinového mechanismu F_B . Na ose y je vynesena síla a osa x znázorňuje celkovou dráhu x kontaktního tělesa. [4]

Celkovou dráhu x si můžeme rozdělit na nejméně $n \geq 10$ stejných úseků. Předpokládejme, že na každém r -úseku síly působí konstantní síla pro jednotlivé průběhy. Výslednou sílu určíme tak, že v jednotlivých úsecích r odečteme průběhy sil. [4]

$$F = F_A - F_B \quad [4.24]$$

Použití této metody bude tím přesnější, s čím větší počtem n -úseků budeme uvažovat na délce l .



Obrázek 4.6 Výsledný průběh síly na dráze celkové dráze l [4]

Základním požadavkem pro výpočet je, aby kinetická energie W pohybujícího se tělesa byla rovna vykonané práci na dráze až ke konci sledovaného r -tého úseku [4]

$$W = \sum_{i=1}^{i=l} F_i \frac{l}{n} = \frac{1}{2} m v_r^2 \quad [4.25]$$

Kde rychlost tělesa v_r o dané hmotnosti m , daného r -tého úseku

$$v_r = \frac{2l}{n m} \sum_{i=1}^{i=r} F_i \quad [4.26]$$

Pro daný r -tý úsek je střední rychlost v_{rs} rovna

$$v_{rs} = \frac{v_{r-1} + v_r}{2} \quad [4.27]$$

Pro daný r -tý úsek je doba t_n na úseku $\frac{l}{n}$

$$t_r = \frac{l}{n v_{rs}} \quad [4.28]$$

Celková doba t_l dráhy l

$$t_l = \sum_{r=1}^{r=n} t_r = \frac{l}{n} \sum_{r=1}^{r=n} \frac{1}{v_{rs}} \quad [4.29]$$

5 Oteplení přístrojů

5.1 Základní oteplovací jevy a vztahy

5.1.1 Oteplování proudovodiče

Průchodem elektrického proudu vodičem, vzniká elektrické teplo. Část tepla vzniklého ve vodiči se spotřebuje na jeho oteplení a zbytek tepla se odvádí povrchem pryč do okolí. Předpokládáme, že vodičem o konstantním průřezu S , protéká stejnosměrný proud I , tento jev můžeme charakterizovat rovnicí [5]

$$RI^2 \cdot dt = cV \cdot d\theta + \alpha_o P \theta \cdot dt \quad [5.1]$$

V rovnici 5.1 člen $RI^2 \cdot dt$ charakterizuje uvolněné teplo (tepelné ztráty) v určitém časovém okamžiku. V další členu $cV \cdot d\theta$ je charakterizováno teplo, které se spotřebuje na zvýšení teploty o elementární hodnotu $d\theta$. Poslední člen rovnice $\alpha_o P \theta \cdot dt$ charakterizuje kolik tepla je předáno okolí. [5]

Řešením rovnice 5.1 obdržíme vztah

$$\theta = \theta_m \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad [5.2]$$

Ze vztahu 5.2 je patrné, že křivka oteplení bude mít exponenciální charakter. Oteplení bude narůstat z nulové hodnoty až po maximální oteplení θ_m . [4]

Důležitým parametrem je oteplovací časová konstanta τ , která charakterizuje dobu, za kterou vodič dosáhne maximálního oteplení θ_m

$$\tau = \frac{cV}{\alpha_o P} \quad [5.3]$$

Při dlouhodobém průtoku proudu $I = konst.$ dosáhneme ustáleného oteplení a platí, že

$$\frac{d\theta}{dt} = 0 \quad ; \quad \theta = \theta_m \quad [5.4]$$

Kde rovnice 5.1 nabude tvaru

$$RI^2 = \alpha_o P \theta_m \quad [5.5]$$

Z rovnice 5.5 je patrné, že po ustálení oteplení už teplota dále neroste, tím pádem veškeré vzniklé teplo je předáno do okolí.

Následně můžeme vyjádřit maximální dovolené oteplení

$$\theta_m = \frac{qV}{\alpha_o P} \quad [5.6]$$

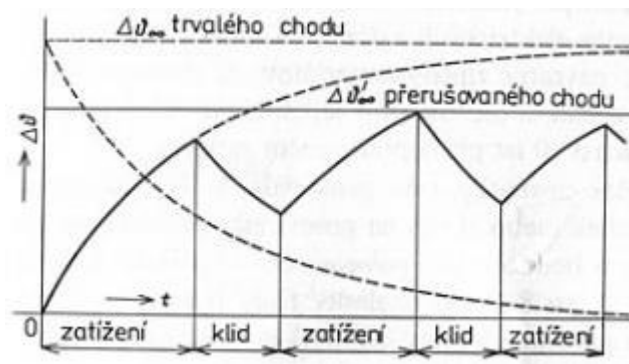
Kde člen qV charakterizuje součet všech ztrát v daném úseku vodiče, resp. tepelný příkon za jednotku času.

5.1.2 Oteplení proudovodiče při přerušovaném chodu

Základní rovnice pro přerušovaný chod

$$0 = cV \cdot d\theta + \alpha_o P \theta \cdot dt \quad [5.7]$$

Jelikož vodičem přestane protékat proud, tedy proud $I = 0$ nedochází k jeho oteplování. Akumulovaná energie ve vodiči předává tepelnou energii do okolí. Dochází k tomu, že se vodič ochlazuje a jeho teplota klesá. Znázorněno na obrázku 5.1. [4]



Obrázek 5.1 Průběh oteplení pro jednotlivé chody [4]

Řešením rovnice 5.7 je

$$\theta = \theta_m \left(e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad [5.8]$$

5.1.3 Krátkodobé oteplení

S krátkodobými ohřevy se můžeme setkat nejčastěji při zkratu. U krátkodobého oteplení se předpokládá, že veškeré teplo se akumuluje v tělese a zvyšuje pouze jeho oteplení. Pouze za podmínky prochází-li vodičem proud, který je kratší než 2τ . U krátkodobého oteplení předpokládáme, že součinitel přestupu tepla $\alpha_o = 0$. Rovnice 5.1 nabude tvaru [5]

$$RI^2 \cdot dt = cV \cdot d\theta \quad [5.9]$$

Zavedením vstupních podmínek $t = 0$, $\Delta\theta = \Delta\theta_k = 0$ dostaneme velikost krátkodobého oteplení. Rovnice 5.10 respektuje celý objem vodiče. Prochází-li konstantním vodičem proud I o objemu V v časovém okamžiku kratším než 20 % jeho tepelné časové konstanty, tak zanedbáváme odvod tepla do okolí. Oteplení θ_k za dobu t_k

$$\theta_k = \frac{R \cdot I^2}{cV} t_k = \frac{\sigma^2 \rho}{c} t_k \quad [5.10]$$

V praxi však nejčastěji používáme výraz 5.11, kde je zaveden údaj rezistivity a proudové hustoty [5]

$$\theta_k = \frac{o l I^2}{c l S^2} t_k = \frac{o}{c} \left(\frac{I}{S} \right)^2 t_{kd} = \frac{o \sigma^2}{c} t_k \quad [5.11]$$

Pokud se jedná o vodič konstantního průřezu, určíme tím oteplení celého tělesa. Pokud vodič není konstantního průřezu, počítáme s místem nejmenšího průřezu, kde je předpoklad, že bude místo s největší proudovou hustotou. [4]

Rovnice 5.10 a 5.11 platí pouze za předpokladu, že známe efektivní hodnotu proudu za dobu krátkodobého oteplení. [4]

Při změně velikosti proudu s časem, musíme rovnici upřesnit náhradou

$$I^2 t_k = \int_0^{t_k} i^2(t) dt \quad [5.12]$$

Kde ve vztahu 5.11 nám c značí měrné teplo, R odpor a σ proudovou hustotu daného tělesa. Předpoklad je, že nejhorší případ nastává při zkratu a maximální teplotě okolí T_{0m} a navazuje na předchozí oteplení tělesa θ_n jmenovitým proudem. [4]

Teplota tělesa dosáhne maximální teploty

$$T_k = T_{0m} + \theta_n + \theta_k \quad [5.13]$$

Maximální teplota okolí nesmí přesáhnout hodnotu teploty dle tabulky 5.1

Tabulka 5.1 Maximální teploty materiálu

Materiál		$T_{Kmax} [^{\circ}C]$
Hliník a jeho slitiny		200
Měď a barevné kovy		300
Ocel		400
Vodiče ve styku s izolanty třídy	Y	200
	A nebo v oleji	250
	E, B a vyšších	Dle kovu vodiče

Pro dílce kontaktních částí platí tyto omezení jen ve styku s izolanty nebo olejem. Ve vzduchu platí jen omezení svaření kontaktů.

Musíme respektovat změnu měrného odporu vodiče v závislosti na teplotě. Výchozí hodnota měrného odporu ρ_n platí pro vypočtenou teplotu daného vodiče [4]

$$\rho_n = \rho_{40} \cdot (1 + \alpha_{40} \cdot \theta_m) \quad [5.14]$$

Vypočítat dovolené krátkodobé oteplení můžeme dvojím způsobem

- buď dobu průtoku t_k pro zadaný proud I a vypočtené oteplení θ_k

$$\alpha_n = \alpha_{40} \frac{\rho_{40}}{\rho_n} = \frac{\alpha_{40}}{(1 + \alpha_{40} \cdot \theta_m)} \quad [5.15]$$

$$k = \frac{\sigma^2 \rho_n}{c} = \frac{\sigma^2 \rho_{40} \cdot (1 + \alpha_{40} \cdot \theta_m)}{c} \quad [5.16]$$

$$t_k = \frac{\theta_k}{k + \alpha_n k \theta_k} \quad [5.17]$$

- nebo dovolený proud I za danou dobu t_k a vypočtené oteplení θ_k

$$\alpha_n = \alpha_{40} \frac{\rho_{40}}{\rho_n} = \frac{\alpha_{40}}{(1 + \alpha_{40} \cdot \theta_m)} \quad [5.18]$$

$$k = \frac{\theta_k}{t_k + \alpha_n t_k \theta_k} \quad [5.19]$$

$$I_k = S \sqrt{\frac{k c}{\rho_n}} \quad [5.21]$$

5.2 Tepelné pole

Teplo se šíří z místa vzniku do okolí, a to z bodu s větší tepelnou energií do místa s menší tepelnou energií, nikdy ne naopak. Máme tři druhy šíření tepla kondukcí, konvencí a sáláním. Šíření tepla kondukcí se primárně uplatňuje v pevné hmotě. Konvekce se uplatňuje v kapalinách, u kapalin dochází i k částečné kondukcii. V plynech mohou nastat všechny tři druhy šíření tepla, u kondukcce jen v omezených případech. V případě vakua dochází jen k šíření tepla sáláním. Jedním z nutných požadavků je homogenita prostředí. [4]

V případě, že je prostředí stejnorodé, vzniká v něm tepelné pole, které je polem skalárním stejně jako pole elektrostatické nebo proudové. Potenciální veličinou je teplota θ nebo oteplení $\Delta\theta$. Rozložení zdrojů v prostoru je charakterizováno Poissonovou rovnicí [4]

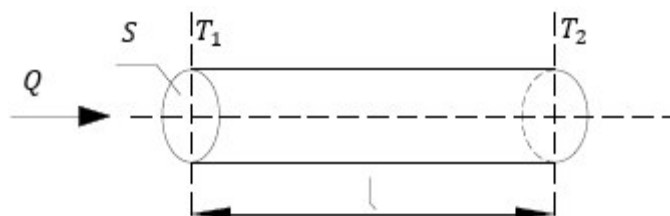
$$\frac{\gamma^2 \theta}{\gamma x^2} + \frac{\gamma^2 \theta}{\gamma y^2} + \frac{\gamma^2 \theta}{\gamma z^2} = -\frac{q}{\lambda} \quad [5.22]$$

Kde v pravá strana rovnice značí měrnou tepelnou vodivost prostředí λ a měrné ztráty q . Za předpokladu, že v uvažovaném prostoru nevzniká teplo $q = 0$, tak Poissonova rovnice přejde v rovnici Laplaceovou [4]

$$\frac{\gamma^2 \theta}{\gamma x^2} + \frac{\gamma^2 \theta}{\gamma y^2} + \frac{\gamma^2 \theta}{\gamma z^2} = 0 \quad [5.23]$$

Přesto, že se jednotlivé pole liší, tak lze v praxi použít vztahy pro výpočet tepelného toku ze vztahů, které mají stejné znění jako vzorce pro vedení elektrického proudu v elektrických obvodech. [4]

5.2.1 Základní zákony tepelného toku



Obrázek 5.2 Teplotní spád v tělese

Velikost tepelného toku Q je za pomoci analogie mezi elektrickým a tepelným polem vázaná k teplotnímu spádu θ . U elektrického pole tato analogie odpovídá Ohmovu zákonu

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{R_T} = \frac{\theta}{R_T} \quad [5.24]$$

Ve vztahu 5.24 R_T charakterizuje tepelný odpor tělesa

$$R_T = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} \quad [5.25]$$

Tepelné odpory dalších geometrických těles viz. literatura [6, str.46-47].

Tepelný odpor tělesa o povrchu P , který přestupuje do okolí je dán

$$R_{T\infty} = \frac{1}{\alpha_o O l} \quad [5.26]$$

Kde α_o charakterizuje součinitel přestupu tepla a $O \cdot l$ udává povrch tělesa. Chceme-li počítat ochlazování povrchu vodiče s tepelnými odpory mezivrstev, musíme zavést náhradní součinitel přestupu tepla α_{on} [6]

$$\alpha_{on} = \frac{1}{P_{vod} \left(\sum R_T + \frac{1}{\alpha_o P_{vně}} \right)} \quad [5.27]$$

Kde P_{vod} charakterizuje povrch vodiče a $P_{vně}$ je vnější povrch vodiče. R_T je odpor vrstvy nebo součet vrstev mezi povrchem vodiče a vnějším povrchem tělesa. [6]

5.2.2 Chladihost povrchu

Z povrchu těles dochází k přestupu tepla do okolního prostředí, tento proces může fungovat i naopak. Proces předávání tepla do okolí probíhá obecně sáláním, vedením a prouděním. Teplo mezi povrchem tělesa a kapalinou je předáváno jen vedením a prouděním. V tekutinách, respektive v plynech a kapalinách, je vedení a proudění neoddělitelně vzpájato. Proces předávání tepla z povrchu tělesa probíhá tak, že vedením se ohřívá malá vrstva media, která je přilehlá k danému povrchu tělesa. U povrchu tělesa má tekutina stejnou teplotu jako těleso. Při ohřátí media se zvětší objem, ale hustota se zmenší. Zde začne platit Archimédův zákon, kde rozdíl tíhy studeného a teplého prostředí vyvolává vztlak, teplé prostředí působí na ohřátý objem směrem proti zemské kůře. Dochází k tzv. výměně, kde teplé prostředí se začne pohybovat směrem vzhůru a chladné prostředí přitéká na místo teplého. U elektrických přístrojů se zpravidla jedná o proudění přirozené. Nucené proudění není až tak časté, většinou, když už je použité, bývá realizováno rotačním nebo pístovým kompresorem. [5]

S předpokladem, že odvod tepla je doprovázen navíc sáláním, což má za následek, že odváděné teplo není již přímo úměrné rozdílu teplot, jak je tomu v případě pevných těles. Jedná-li se však o přestup tepla, malého teplotního rozdílu, které nastává u elektrických izolantů třídy Y až H, můžeme použít pro výpočet součinitele přestupu tepla α_o . [4]

Přímý součet složek odvodu tepla můžeme provést jen v případě totožnosti chladících ploch a rovnosti jejich oteplení vůči okolí. [4]

$$\alpha_o = \alpha_k + \alpha_z \quad [5.28]$$

Jestliže je povrch tělesa z části konkávní platí, že $P_z < P_k$, kde pro sálání uvažujeme jen s obrysovou obálkou povrchu tělesa, proloženou vrcholovými hranami vyčnívajícími částmi. Je-li vztažena celková chladivost povrchu α_0 k celkovému chlazenému povrchu konvencí [4]

$$\alpha_0 = \alpha_k + \alpha_z \frac{P_z}{P_k} \quad [5.29]$$

5.2.3 Měrná chladivost povrchu sáláním

$$\alpha_z = 5,7 \cdot 10^{-8} E_z (T^2 + T_0^2) \cdot (T + T_0) \quad [5.30]$$

Ve vztahu 5.30 nám T značí absolutní teplotu vyzařujícího povrchu, T_0 udává teplotu okolí, v rozmezí teplot $T_0 \in \langle 0^\circ \text{C}, 40^\circ \text{C} \rangle$. [4]

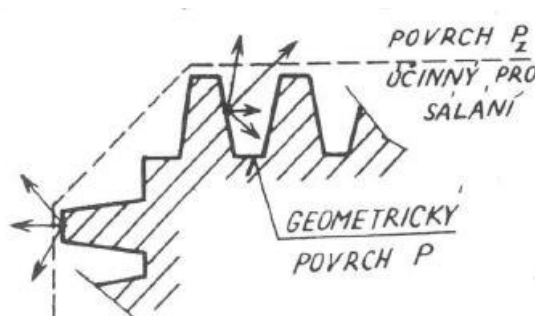
$$\alpha_z = E_z [4,6 + 0,06T_0 + (0,034 + 0,0002T_0)\theta] \quad [5.31]$$

Ve vztahu 5.31 θ udává oteplení v rozsahu $\theta \in \langle 0^\circ \text{C}, 120^\circ \text{C} \rangle$. Ve vztazích 5.30 a 5.31 E_z značí relativní činitel sálání dle tabulky 5.2. [4]

Tabulka 5.2 Hodnoty relativního činitele sálání [4]

Materiál a povrch		E_z	Materiál a povrch		E_z
Měď	Kovově lesklá	0,1	Hliník	Kovově lesklý	0,05
	Oxidovaná	0,8		Oxidovaný	0,15
Ocel a litina	Hrubý odlitek	0,8	Nátěr	Stříbrně lesklý	0,4
	Čistě opracovaná	0,3		Barevně lesklý	0,8 – 0,9
	Oxidovaná	0,65		Černý matný	0,95

Při výpočtu chlazení tělesa sáláním je třeba brát v úvahu tvar povrchu tělesa a uspořádání jeho okolního prostoru.



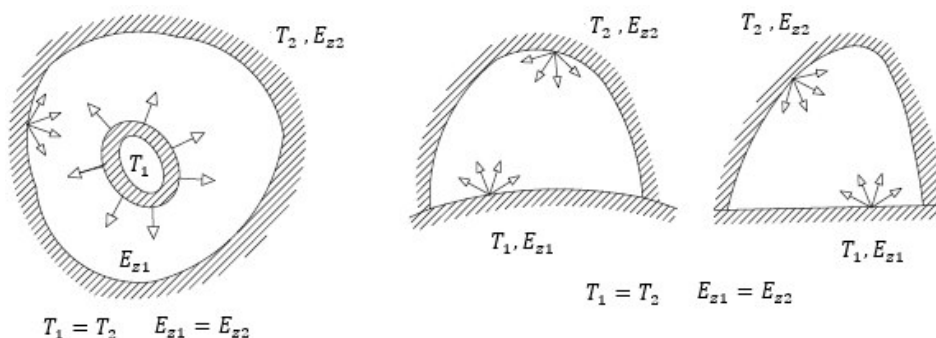
Obrázek 5.3 Tvar povrchu tělesa s vyznačením sálání [5]

Ze vztahů pro výpočet měrné chladiivosti povrchu, můžeme z hlediska záření považovat skutečný geometrický povrch tělesa jen tehdy, pokud je konvexní nebo rovinný. Za předpokladu, že povrch tělesa je konkávní způsobuje, že část sálání dopadá na jiné místo zářícího povrchu. Účinná plocha P_z je menší než geometrický povrch tělesa P . V tomto případě vždy počítáme jen s konvexní nebo s rovinnou plochou ve směru záření. Na obrázku 5.3 je znázorněn obrázek s chladícími žebry, který je typickým příkladem pro rozdílnosti geometrického povrchu. [4]

V předcházející části jsme předpokládali, že při předávání tepla zářičem byl okolo něj zcela volný prostor. Zcela běžně se okolo zářiče vyskytují jiné zářiče nebo je těleso uzavřeno zářícími stěnami. Za takového stavu blízká tělesa brání vyřazování tepelných paprsků do volného prostoru a část energie se vrací zpět do zářiče odrazem, v závislosti na vzájemných teplotách. Jakákoliv z těchto možností snižuje účinnost chlazení sáláním. Proto musíme vztahy 5.30 a 5.31 při výpočtech doplnit činitelem zmenšení chladiivosti povrchu. [5]

Nastane-li případ, kdy předávání tepla sáláním mezi dvěma stejně velkými stěnami, s různými emisivitami E_{z1} a E_{z2} a teplotami $T_1 > T_2$ zůstávají vztahy v platnosti. Rozdíl je však v hodnotě účinné emisivity, která se mění v E_{z12} dle

$$E_{z12} = \frac{1}{\frac{1}{E_{z1}} + \frac{1}{E_{z2}} - 1} \quad [5.32]$$



Obrázek 5.4 Příklady sálání mezi rozdílnými emisivitami a teplotami [5]

V případě, kdy plocha P_2 obklopuje menší a teplejší plochu P_1 , jak uvedeno na obrázku 5.4 je výsledný emisní činitel dán vztahem

$$E_{z12} = \frac{1}{\frac{1}{E_{z1}} + \frac{P_1}{P_2} \left(\frac{1}{E_{z2}} - 1 \right)} \quad [5.33]$$

Vztah 5.33 platí i pro plochy, které spolu tvoří uzavřený prostor dle obrázku 5.4. Ve všech případech musí být teplejší a menší plocha P_1 , všude konvexní nebo rovinná.

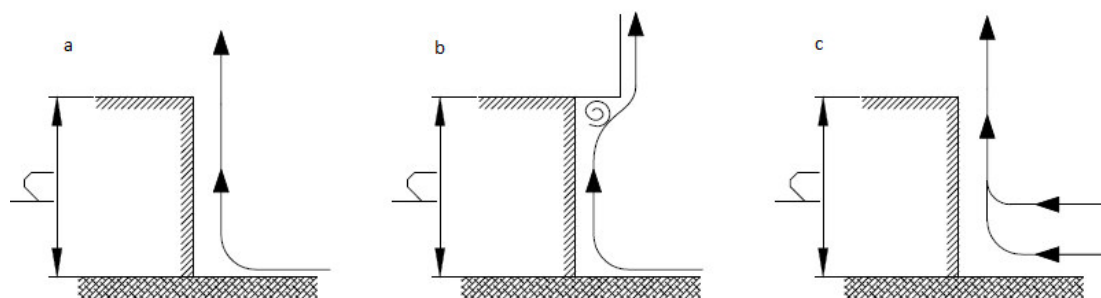
5.2.4 Měrná chladiivost povrchu konvencí

Měrnou chladiivost α_k při přestupu tepla ze stěny přirozenou konvencí do okolního volného prostoru počítáme dle tabulky 5.3, vztah zvolíme podle odpovídající konfigurace chlazeného útvaru.

Tabulka 5.3 Měrná chladihost konvencí dle chlazeného útvaru [4]

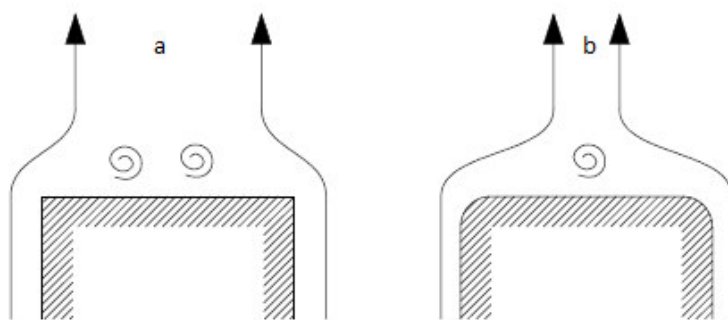
Chlazený útvar		$\alpha_k [K, m]$	Poznámka	
Vodorovný válec o průměru D		$1,3 \left(\frac{\theta}{D}\right)^{0,25}$	$D \leq 0,3 m$	
Dlouhá svislá stěna		$1,8 \theta^{0,25}$	Výška stěny h	$h > 0,3 m$
Krátká svislá stěna		$1,35 \left(\frac{\theta}{h}\right)^{0,25}$		$h < 0,3 m$
Vodorovná plocha	Rozměrná, chladící nahoru	$2,5 \theta^{0,25}$	Kratší strana obdélníkové plochy h	$h > 0,3 m$
	Menší, chlazená nahoru	$1,3 \left(\frac{\theta}{h}\right)^{0,25}$		$h < 0,3 m$
	Rozměrná, chlazení dolů	$1,3 \theta^{0,25}$		$h > 0,3 m$
	Menší, chlazení nahoru	$0,6 \left(\frac{\theta}{h}\right)^{0,25}$		$h < 0,3 m$

Jsou-li stěny odkloněny od svislice o úhel φ , musíme příslušný vztah uvedený v tabulce 5.3 vynásobit $(\cos \varphi)^{0,25}$. Vztahy uvedené pro svislé stěny v tabulce 5.3 platí pro obrázky 5.5. Na obrázku 5.5a je vyobrazeno základní chlazení, kde vzduch proudí zespodu a stoupá směrem vzhůru bez jakékoliv překážky. Zhoršené chlazení je vyobrazeno na obrázku 5.5b, kde nedochází k rovnoměrnému odvodu chladicího vzduchu díky záhybu. Obrázek 5.5c znázorňuje lepší chlazení konvencí díky většímu objemu přivedeného vzduchu. [4]



Obrázek 5.5 Svislé chlazení stěny konvencí [4]

Vypočtená chladihost pro vodorovné stěny se mění, je-li uvažovaná plocha součástí rozměrnějšího tělesa, má-li okraje ostré či zaoblené a liší-li se přítok a odvod chladicího média od základního uspořádání. [4]



Obrázek 5.6 Vodorovné chlazení konvencí [4]

V případě chlazení svislých stěn do úzkého, na obou koncích otevřeného kanálu, platí pro α_k dle tabulky 5.3 jen za předpokladu, že šířka kanálu splňuje podmínku z nerovnice 5.34

$$\delta > \frac{2\lambda}{\alpha_k} \quad [5.34]$$

V nerovnici značí λ tepelnou vodivost vzduchu při dané teplotě. Pro zjednodušení tepelných výpočtů často mocninovou závislost měrné tepelné chladivosti α_o na oteplení povrchu θ_p linearizujeme [4]

$$\begin{aligned} \alpha_o &= A + B\theta_p = (A_1 + NA_2) + (B_1 + NB_2)\theta_p \\ &= A_1 + B_1\theta_p + (A_2 + B_2\theta_p)N = \alpha_k + N\alpha_z \end{aligned} \quad [5.35]$$

Tabulka 5.4 Základní linearizované vztahy pro měrnou chladivost zářením a konvencí [4]

Měrná chladivost zářením α_z	Podmínky	Měrná chladivost konvencí α_k	Podmínky
$\alpha_z = 6 + 0,037\theta_p$	$E_z = 0,9; T_0 = 35^\circ\text{C}$	$\alpha_k = 3 + 0,03\theta_p$	Dlouhá svislá stěna, $h > 0,3\text{ m}$
$\alpha_z = 6,3 + 0,038\theta_p$	$E_z = 0,9; T_0 = 40^\circ\text{C}$	$\alpha_k = 3 + 0,03\theta_p$	Vodorovný válec o průměru - $0,3\text{ m}$ Svislá stěna o výšce - $0,3\text{ m}$ vodorovná stěna nahoru o šířce $0,3\text{ m}$
$\alpha_z = 5,4 + 0,033\theta_p$	$E_z = 0,8; T_0 = 35^\circ\text{C}$	$\alpha_k = 3,3 + 0,035\theta_p$	Dtto $0,2\text{ m}$
$\alpha_z = 5,6 + 0,034$	$E_z = 0,8; T_0 = 40^\circ\text{C}$	$\alpha_k = 3,7 + 0,046\theta_p$	Dtto $0,1\text{ m}$
$\alpha_z = 2,7 + 0,016\theta_p$	$E_z = 0,4; T_0 = 35^\circ\text{C}$	$\alpha_k = 4,3 + 0,055\theta_p$	Dtto $0,05\text{ m}$

$\alpha_z = 2,8 + 0,017\theta_p$	$E_z = 0,4; T_0 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\alpha_k = 6 + 0,09\theta_p$	Dtto	0,01 m
$\alpha_z = 1,1 + 0,006\theta_p$	$E_z = 0,15; T_0 = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\alpha_k = 7 + 0,12\theta_p$	Dtto	5 mm

5.2.5 Chlazení přes uzavřený prostor

Předpokládáme chlazení přes uzavřený prostor, který má svůj prostor naplněn plynem nebo kapalinou, dochází k proudění daného média a následně se zvětšuje i tepelná vodivost λ na novou hodnotu tepelné vodivosti, a to na ekvipotenciální tepelnou vodivost λ_e . Díky ekvipotenciální tepelné vodivosti vypočteme přestup tepla z teplejší stěny T_1 na chladnější T_2 , jako přestup tepla pouhým vedením. [4]

Empirický vztah pro výpočet ekvipotenciální tepelné vodivosti je dán vztahem

$$\lambda_e = C \cdot \delta^{0,75} = C(T_1 - T_2)^{0,25} \quad [5.36]$$

Kde δ nám udává vzdálenost jednotlivých stěn, mezi kterými proudí teplo. C je materiálová konstanta, která je závislá na střední teplotě T_s proudícího média [4]

$$T_s = \frac{1}{2}(T_1 + T_2) \quad [5.37]$$

Pokud výsledná hodnota ekvipotenciální tepelné vodivosti λ_e je menší, než klidová tepelná vodivost λ , vzniká malý teplotní spád, který způsobuje zánik proudění. [4]

Dále musíme uvažovat s přestupem tepla sáláním. U kapalin se přestup tepla sáláním zcela zanedbává, na rozdíl však u plynů, kde se musí uvažovat. V uzavřeném prostoru při výpočtu uvažujeme s efektivní tepelnou vodivostí λ_{ef} . Efektivní tepelná vodivost λ_{ef} , udává sloučené účinky konvence a záření. Vzorce mají různé podoby, u kterých záleží především na geometrických tvarech uvažovaného prostoru. [4]

Rovinná vrstva konstantní tloušťky δ

$$\lambda_{ef} = \lambda_e + \alpha_z \delta \quad [5.38]$$

Kolmý jehlan za předpokladu toku směrem od menší T_1 k větší T_2 základně

$$\lambda_{ef} = \lambda_e + \alpha_z \frac{l_1 l}{l + l_1} \quad [5.39]$$

Měrná chladivost záření stěny α_z s vyšší teplotou T_1 , kde E_{z1} a E_{z2} jsou činitele relativních záření materiálu obou protilehlých stěn [4]

$$\alpha_z = \frac{5,7 \cdot 10^{-8}}{\frac{1}{E_{z1}} + \frac{P_z}{P_k} \left(\frac{1}{E_{z2}} - 1 \right)} \cdot (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2) \quad [5.40]$$

5.2.6 Oteplení proudovodné dráhy

U výpočtu oteplení proudovodné dráhy závisí na určení měrné chladivosti jejího povrchu. Je třeba brát v potaz, že se jedná pouze o orientační výpočet, protože přesnou měrnou chladivost povrchu neznáme. Je-li holý vodič o průřezu S , s odporem R , kterým protéká proud I a jeho veškeré ztráty jsou odvedeny jeho povrchem P_v o měrné chladivosti $\alpha_o = A + B\theta_v$, je oteplení vodiče θ_v rovno [4]

$$\theta_v = -\frac{A}{2B} + \sqrt{\left(\frac{A}{2B}\right)^2 + \frac{RI^2}{P_v B}} \quad [5.41]$$

Je-li vodič opatřen izolací, která je složená z n -vrstev materiálů o různých tepelných vodivostech λ_i je celkový odpor izolačních vrstev dán

$$\sum_{i=1}^{i=n} R_{Ti} \quad [5.42]$$

Zavedeme pomocnou veličinu K

$$K = O_p \cdot l \sum_{i=1}^{i=n} R_{Ti} \quad [5.43]$$

Kde O_p udává obvod izolační vrstvy mezi materiálem a vzduchem. l zároveň udává délku mezi krajní izolační vrstvou a vzduchem.

Výpočet oteplení na povrchu vodiče je dán

$$\theta_v = -\left(\frac{1 + AK}{2BK}\right) + \sqrt{\left(\frac{1 + AK}{2BK}\right)^2 + \frac{\theta_v}{BK}} \quad [5.44]$$

Vypočteme měrnou chladivost povrchu izolace

$$\alpha_o = A + B\theta_p \quad [5.45]$$

Následně je vypočtena náhradní měrná chladivost povrchu

$$\alpha_{on} = \frac{1}{O_v l \left(\sum_{i=1}^{i=n} R_{Ti} + \frac{1}{\alpha_o O_p \cdot l} \right)} \quad [5.46]$$

Oteplení vodiče se vzduchovou izolací není závislé jen na oteplení povrchu vodiče θ_p a měrné chladivosti povrchu α_o , ale i na ekvivalentní vodivosti vzduchu λ_{ev} v uzavřeném prostoru. Ekvivalentní vodivost vzduchu závisí na střední teplotě T_s vzduchové mezivrstvy, kterou předem neznáme. Při výpočtech se provádí předběžný odhad ekvivalentní vodivosti vzduchu za pomoci zjednodušených vztahů. [6]

Rovinná vrstva

$$\lambda'_{efv} \approx 1,1\delta^{0,75} + 9E_{z12}\delta \quad [5.47]$$

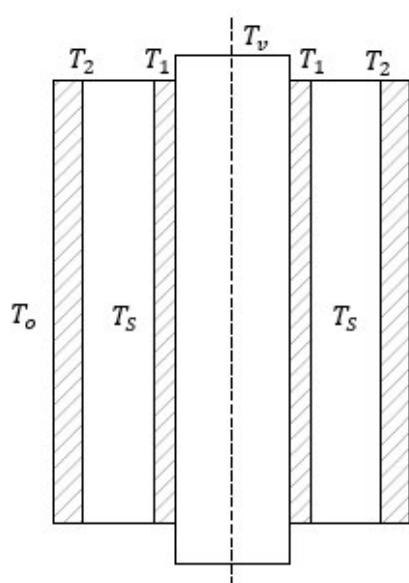
Válcové mezikruží

$$\lambda'_{efv} \approx 1,1\delta^{0,75} + 9E_{z12} \cdot r_1 \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad [5.48]$$

Kolmý kužel nebo jehlan

$$\lambda'_{efv} \approx 1,1\delta^{0,75} + 9E_{z12} \cdot \frac{\delta l_1}{\delta + l_1} \quad [5.49]$$

S odhadnutou teplotní vodivostí vzduchu vypočteme tepelný odpor vzduchové vrstvy R_{Tv} , a pak postupně vypočteme tepelný odpor pevných vrstev mezi vodičem a vzduchem R_{T1} a vrstev mezi olejem a chladícím povrchem R_{T2} . Vypočteme pomocnou veličinu K , oteplení povrchu θ_p a jeho měrnou chladivost α_o . Tepelný tok Q je dán vztahem 5.50. [6]



$$Q = \alpha_o \cdot O_p \cdot l \cdot \theta_p \quad [5.50]$$

Teplota T_2 vzduchové mezivrstvy

$$T_2 = T_o + \theta_p + Q \cdot R_{T2} \quad [5.51]$$

Teplota T_1 vzduchové mezivrstvy

$$T_1 = T_o + \theta_p - Q \cdot R_{T1} \quad [5.52]$$

Střední teplota T_s vzduchové vrstvy

$$T_s = 0,5(T_1 + T_2) \quad [5.53]$$

Skutečná teplotní vodivost vzduchu

$$\lambda_{ev} = C\delta^{0,75} \cdot (T_1 - T_2)^{0,25} \quad [5.54]$$

Obrázek 5.7 Rozhraní vzduchových mezivrstev [6]

Při kontrole odhadu nesmí chyba přesáhnout 5 %.

$$|\Delta|\% = \frac{\lambda_{ev} - \lambda'_{efv}}{\lambda_{ev}} \cdot 100 < 5 \quad [5.55]$$

Za předpokladu, že chyba je větší než 5 %, provedeme celý tepelný výpočet znovu. Přičemž místo λ'_{efv} dosazujeme přesněji vypočtenou hodnotu λ_{ev} . Výpočet dokončíme tak, že stanovíme náhradní měrnou chladivost povrchu α_{on} . [6]

5.3 Náhradní jednořadová tepelná síť

Sestavením náhradní jednořadové tepelné sítě počítáme oteplení přístrojů při trvalém průchodu elektrického proudu s jednou průběžnou elektrovednou dráhou. S jednou průběžnou elektrovednou dráhou se můžeme setkat u jednopólových přístrojů, například u vypínačů vvn. Tato metoda se dá aplikovat i u přístrojů více pólových, ale jen za podmínky, že jednotlivé póly jsou od sebe dostatečně vzdáleny a nedochází tak k jejich vzájemnému sdílení tepla. [4]

Metoda náhradní jednořadové tepelné sítě spočívá v tom, že počítáme oteplení jednotlivých dílců obvodu. Spojením jednotlivých dílců tepelných zdrojů a odporů, za sebou nebo vedle sebe, zhotovíme odpovídající tepelnou síť. Řešením tepelné sítě, určíme výsledné oteplení jednotlivých uzlů tepelné sítě. [6]

5.3.1 Prvky jednořadové tepelné sítě

Sestavená náhradní tepelná síť elektrických přístrojů může obsahovat až osm těchto prvků, které můžeme rozdělit na tyče se ztrátami nebo tyče beze ztrát.

- Tyče beze ztrát

$$R_{Tl} = \frac{\sinh \beta l}{\delta} \quad \text{kde} \quad \beta = \sqrt{\frac{\alpha_0 O}{\lambda S}} \quad [5.56]$$

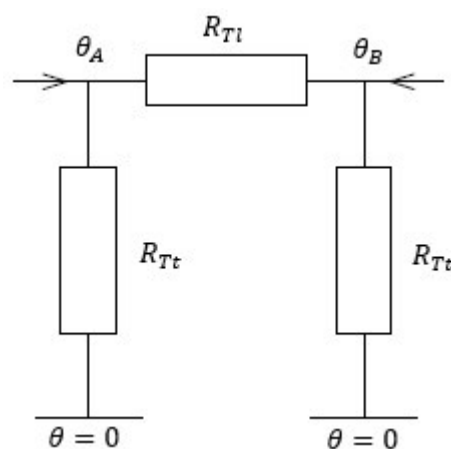
$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \tanh \frac{\beta l}{2}} \quad \text{kde} \quad \delta = \sqrt{\alpha_0 O \lambda S} \quad [5.57]$$

Při tepelně krátké tyči, kdy $\beta l < 0,1$ jsou odpory

$$R_{Tl} = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{l}{S} \quad R_{Tt} = \frac{2}{\alpha_0 O P} = \frac{2}{\alpha_0 P} \quad [5.58]$$

je-li $\beta l \geq 10$, jedná se tepelně dlouhou tyč

$$R_{Tl} = \infty \quad R_{Tt} = \frac{1}{\delta} \quad [5.59]$$

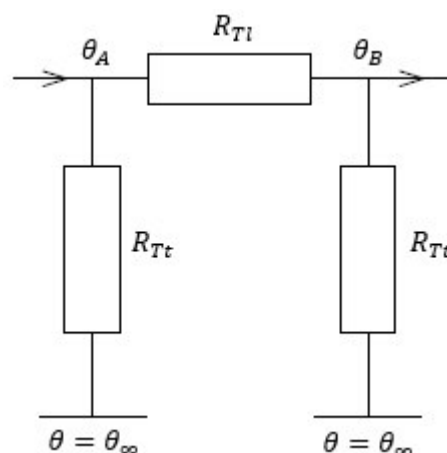


Obrázek 5.8 Náhradní schéma tyče beze ztrát

- Tyče se ztrátami

V tomto případě se změní oteplení příčných odporů na hodnotu θ_∞

$$\theta_\infty = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_{on} P_v} = \frac{R \cdot I^2}{\alpha_{on} O_v P_v} = \frac{\rho \cdot I^2}{\alpha_{on} O_v S_v}$$



Obrázek 5.9 Náhradní schéma tyče se ztrátami

V této podkapitole jsou uvedeny jen příklady náhradních schémat jednořadové tepelné sítě viz. literatura [6.str.59.kap. 2.4.5].

6 Elektromagnet

Elektromagnety jsou nedílnou součástí spínacích přístrojů. Tyto přístroje využívají silové účinky elektrického proudu. Elektromagnety jsou důležité přístroje v oblasti elektrických pohonů, kde umožňují dálkové a autonomní ovládání. [3]

Podle použití

- Přidržené – slouží k přidržení (upínání) feromagnetických materiálů
- Pohybové – vykonávají mechanickou práci pohybem kotvy elektromagnetu

Podle druhu použitého proudu

- Elektromagnety napájeny střídavým proudem
- Elektromagnety napájeny stejnosměrným proudem

Podle zapojení elektromagnetu

- Paralelní – cívka elektromagnetu je zapojena paralelně k síti
- Sériové – používá se u brzdných elektromagnetů sériových stejnosměrných motorů

V diplomové práci bude k spínání kontaktního můstku používat střídavý elektromagnet. V následující části se budeme věnovat teorii střídavého elektromagnetu [3]

6.1 Návrh vinutí cívky elektromagnetu

Počet závitů cívky určíme tak, aby elektromagnet byl schopen spínat i při sníženém napětí o 15%.

$$N = \frac{U_n}{4,44 \cdot f \cdot \phi_m} = \frac{U_n}{4,44 \cdot f \cdot \phi_m \cdot S \cdot K_{Fe}} \quad [6.1]$$

Ve vztahu 6.1 značí ϕ_m maximální hodnotu střídavého magnetického toku, U_n značí efektivní hodnotu napětí, N udává počet závitů cívky, f je frekvence sítě, S je průřez železného jádra a K_{Fe} značí činitel plnění železa. Činitel plnění železa pro plechy o tloušťce 0,5 mm je 0,93 a pro plechy tloušťky 0,35 mm je činitel 0,90. [6]

Z hlediska oteplení musíme znát proud I_1 na začátku zdvihu a proud I_2 v přidržném stavu elektromagnetu, abychom mohli stanovit vhodný průřez vodiče cívky elektromagnetu.

Nezanedbáme-li odpor vinutí platí vztah 6.2 pro výpočet proudu

$$I = \frac{1,1U_n}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad [6.2]$$

Ze vztahu 6.2 vyjádříme indukčnost L následovně

$$L = \frac{K_L N^2 S \mu_r \mu_0}{\mu_r \sum \delta + l_{fe}} \quad [6.3]$$

V rovnici 6.3 nám l_{fe} značí střední délku dráhy magnetického toku v železe. μ_r udává relativní permeabilitu plechů a μ_o relativní permeabilitu vakua. K_L je experimentálně zachycený činitel, který značí změnu indukčnosti, tento činitel odečítáme z příslušných grafů pro daný tvar elektromagnetu. [6]

Průřez drátu q volíme podle

$$q = \frac{I}{\sigma} = \frac{I}{2 \div 4} \quad [6.4]$$

Za I dosazujeme hodnotu klidového proudu. Vypočteme minimální dovolený průřez vodiče. Zvolíme nejbližší vyšší normalizovaný průřez a navrhne izolaci cívky. Proudovou hustotu σ zvolíme vyšší pro občasnou funkci a nižší proudovou hustotu pro větší počet spínání. [6]

Při velké hustotě spínání, ovlivňuje hustotu spínání i záběrný proud cívky. Proto při velké hustotě spínání určujeme ekvivalentní proud I_e pomocí výrazu [6]

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\frac{t_1}{3} (I_1^2 + I_2^2 + I_1 I_2) + t_2 I_2 \right]} \quad [6.5]$$

Doba t_1 ve vztahu 6.5 charakterizuje dobu zapnutí elektromagnetu, kdy se mění hodnota zapínacího proudu I_1 , který se skládá z doby pohybu kotvy Δt_z a doby Δt po kterou proud narůstá z nuly na efektivní hodnotu podle vztahu

$$i_z = I_1 \sqrt{2} \left[\sin(\omega t + \psi) - \sin \psi \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \right] = -I_1 \quad [6.6]$$

Po splnění této podmínky víme, že tah elektromagnetu překoná bezpečně všechny odpory. Přídavný čas Δt je nejkratší pro $\psi = 0$ a dosazujeme pro $\Delta t_1 = 2,5 \text{ ms}$. Pro nejdelší čas platí $\psi = 0,5\pi$, který je určen rovnicí

$$\cos \omega \cdot \Delta t_2 + \frac{1}{\sqrt{2}} = e^{-\frac{R}{L} \Delta t_2} \quad [6.7]$$

Rovnici 6.7 řešíme graficky nebo numericky postupným srovnáváním pravé a levé strany. Protože čím větší je počet cyklů, tím je pravděpodobnost výskytu jednotlivých úhlu větší $\psi \in (0, \pi)$, při velkém počtu cyklů uvažujeme střední hodnotu přídavného času Δt [6]

$$\Delta t = 0,5 \cdot (\Delta t_1 + \Delta t_2) \quad [6.8]$$

Kde pak čas t_1 odpovídá

$$t_1 = t_2 + \Delta t \quad [6.9]$$

6.1.1 Oteplení cívky elektromagnetu

Výpočet oteplení cívky vypočteme z většího proudu I_2 nebo I_e . Určíme chladicí povrch cívky P_c , měrnou chladivost α_o v linearizovaném tvaru a výpočtem oteplení povrchu cívky θ_p dle [6]

$$\theta_p = -\frac{A}{2B} + \sqrt{\left(\frac{A}{2B}\right)^2 + \frac{RI^2}{P_c B}} \quad [6.10]$$

K odvodu tepla z povrchu cívky do okolí dochází zpravidla jen jejím povrchem. K průtoku tepla od spodních vrstev dochází přes závitovou a mezi závitovou izolaci k vyššímu vnitřnímu oteplení než na vnějším povrchu cívky, proto určujeme střední oteplení vinutí $\Delta\theta$. [6]

Při výpočtech oteplení zavádíme zjednodušující předpoklady:

- veškeré teplo vzniklé v cívce proudí jen v radiálním směru k vnějšímu plášti,
- elektrický odpor všech vrstev vodiče je stejný,
- vinutí spolu se závitovou a mezi závitovou izolací je charakterizováno ekvivalentní tepelnou vodivostí λ_e .

Ekvivalentní tepelná vodivost λ_e

$$\lambda_e \approx \frac{\lambda_i(d + \delta)}{\delta} \quad [6.11]$$

Ve vztahu 6.11 je λ_i tepelná vodivost izolace, d průměr vodiče a δ tloušťka izolace. Dále podle tvaru cívky vypočteme tepelný odpor cívky R_T ve směru tepelného toku a pak přírůstek oteplení nejspodnější vrstvy vinutí $\Delta\theta$ [6]

$$\Delta\theta = k_n R_T R \cdot I^2 \quad [6.12]$$

V rovnici 6.12 činitel k_n je závislý na počtu vrstev cívky, který určíme dle

$$k_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} i = \frac{1+n}{2n} \quad [6.13]$$

Maximální oteplení cívky je dáno součtem oteplení povrchu cívky a přírůstkem oteplení nejspodnější vrstvy a nesmí přesáhnout dovolenou hodnotu

$$\theta_{max} = \theta_p + \Delta\theta \quad [6.14]$$

6.2 Tažná síla jednofázového elektromagnetu

U elektromagnetu napájeným střídavým proudem je amplituda magnetického toku stálá a je daná vztahem [6]

$$\phi_{max} = \frac{U_n}{4,44 \cdot f \cdot N} \quad [6.15]$$

Ve vztahu 6.15 značí ϕ_{max} maximální hodnotu střídavého magnetického toku, U značí efektivní hodnotu napětí, N udává počet závitů cívky a f je frekvence sítě.

Rozptyl elektromagnetického toku způsobuje, že tah střídavého elektromagnetu není během celého zdvihu stálý. Stálý magnetický tok je jen za předpokladu stálé magnetické indukce ve vzduchové mezeře. [6]

Při zanedbání rozptylu je amplituda magnetické indukce dána vztahem 6.16 a nezávisí na velikosti vzduchové mezery

$$B_\delta = \frac{\phi_{max}}{S} = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot N \cdot S} \quad [6.16]$$

Jelikož se magnetický tok mění podle sinusoidy, znamená to, že se přitažlivá síla mění s funkcí $\sin^2 \omega t$ podle vztahu

$$F_{\delta} = 4 \cdot 10^5 (K_F \cdot B_m)^2 S K_{fe} \quad [6.17]$$

Ve vztahu 6.17 K_F charakterizuje činitel rozptylu, K_{fe} vyjadřuje činitel plnění ve vzduchové mezeře, který se pohybuje v rozmezí 0,93-0,95. B_m je elektromagnetická indukce ve vzduchové mezeře.

Statickou charakteristiku kotvy elektromagnetu v závislosti na zmenšující se vzduchové mezeře vypočteme dle [6]

$$F_x = F_{\delta} \left(\frac{K_{Fx}}{K_{F\delta}} \right)^2 \quad [6.18]$$

6.3 Závít nakrátko

Přitažlivá síla jednofázového elektromagnetu kmitá, což způsobuje chvění kotvy a její bzučení. Odstranění těchto negativních vlivů se realizuje tzv. závitem nakrátko, který je umístěn na pólech jednofázového elektromagnetu. [3]

Část hlavního elektromagnetického toku ϕ prochází plochou závitu nakrátko a svou změnou se v něm indukuje napětí U_{1k} , který způsobí v závitě proud I_k . Proud, vzniklý v závitě nakrátko, vybudí pomocný magnetický tok ϕ_k , který předbíhá hlavní magnetický tok ϕ o 90° . Z toho vyplývá, že pomocný magnetický tok ϕ_k je v maximálním okamžiku hlavního magnetického toku ϕ nulový. Ale naopak pokud je hlavní magnetický tok ϕ nulový, pak pomocný magnetický tok ϕ_k závitu nakrátko je ve svém maximu, takže přidrží kotvu v zapnuté poloze a vyloučí chvění kotvy. [3]

Za předpokladu zjednodušení, lze odvodit pro danou velikost stínění pólu tyto optimální velikosti odporu závitu nakrátko R_k [6]

$$\text{Pro stínění 50 \%} \quad R_{k50} = \frac{2Sf \cdot 10^{-6}}{\delta_o} \quad [6.19]$$

$$\text{Pro stínění 70 \%} \quad R_{k70} = \frac{4Sf \cdot 10^{-6}}{\delta_o} \quad [6.20]$$

Vzhledem k tomu, že chceme docílit co možná největší účinnosti závitu nakrátko doporučuje se dodržet tyto základní požadavky:

- vzduchovou mezeru při dotažení kotvě co nejmenší v rozmezí 0,01 až 0,1 mm,
- výška závitu nakrátko co nejnižší,
- docílit co největšího koeficientu plnění železa,
- stínění pólů o ploše S kruhem nakrátko udržet v mezích 0,6 S až 0,75 S .

Je-li navrhovaný závit nakrátko navrhován pro $f = 50 \text{ Hz}$ a jsou dodrženy uvedené podmínky, vztah pro optimální velikost odporu upraví na tvar rovnic 6.17 až 6.19 [6]

$$\text{Pro stínění 50 \%} \quad R_{k50} = (1 \div 2)S \quad [6.21]$$

$$\text{Pro stínění 60 \%} \quad R_{k60} = (2 \div 3)S \quad [6.22]$$

$$\text{Pro stínění 70 \%} \quad R_{k70} = (2 \div 4)S \quad [6.23]$$

Doporučené nejmenší stínění je 60 %. Skutečný průřez závitů nakrátko se následně kontroluje z hlediska odvedených ztrát. Zároveň se snažíme co možná nejvíce přiblížit optimální hodnotě odporu. Zvýšením velikosti odporu závitů nakrátko R_k nad optimální hodnotu se negativně projevuje snížením jeho účinnosti. [6]

S výpočtem závitů nakrátko je zapotřebí určit jeho maximální přípustné ztráty P_k jako rozdíl mezi celkovými dovolenými ztrátami P_{Fmax} a celkovými a skutečnými ztrátami v železe P_{Fskut}

$$P_k = P_{Fmax} - P_{Fskut} \quad [6.24]$$

Skutečné ztráty v železe jsou dány vztahem

$$P_{Fskut} = 0,5 \theta \rho_{Fe} B_m^2 G k_k \quad [6.25]$$

Kde ρ_{Fe} charakterizuje ztrátové číslo, kde pro dynamoplechy o tloušťce 0,5 mm se pohybuje v rozsahu 2,0 až 3,6 W/kg a pro transformátorový plech o tloušťce 0,35 mm se ztrátové číslo pohybuje v rozmezí 1 až 1,3 W/kg. Činitel k_k charakterizuje zvětšení ztrát vlivem stříhání a nýtování. [6]

Maximální přípustné ztráty v železe o chladícím povrchu S_o , dané měrné chladivostí α_o a dovoleném oteplení jsou dána

$$P_{Fmax} = \alpha_o S_o \theta_{Fe} \quad [6.26]$$

Napětí na jednom závitě na krátko U_k

$$U_k = \frac{1,1 U}{N} z \quad [6.27]$$

Pro jádrový typ je stínící koeficient v rozmezí $z = 0,6$ až $0,75$ a pro plášťový typ je v rozmezí $0,3$ až $0,37$. [6]

Minimální reálný odpor závitů nakrátko R_k při x závitech je

$$R_{min} = \frac{x U_k^2}{P_k} \sim \epsilon \langle 2S, 3S \rangle \quad [6.28]$$

Maximální tolerovaný průřez závitů nakrátko S_k , při jeho délce l_k

$$S_{kmax} = \frac{\rho l_k}{R_{kmin}} \quad [6.29]$$

7 Návrh stykače

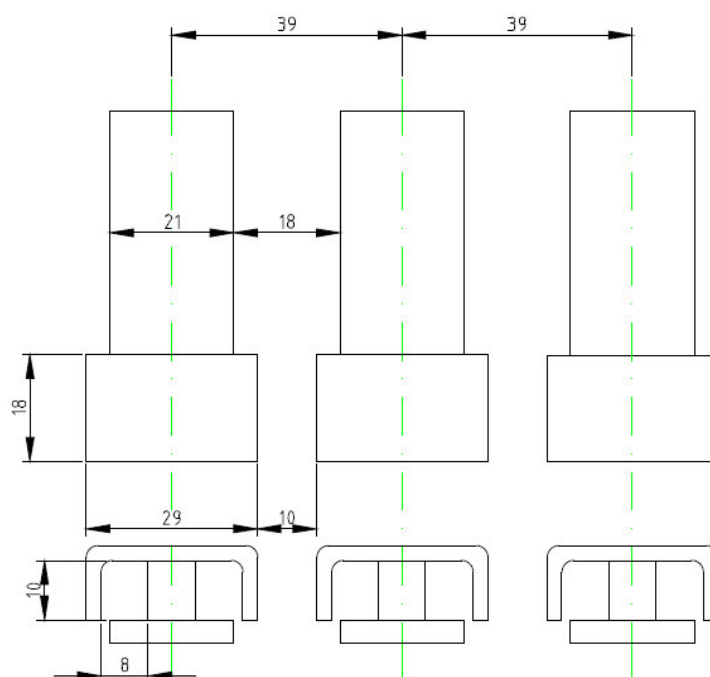
7.1 Parametry požadovaného stykače

Tabulka 7.1 Zadané parametry stykače

Parametr	Zadaná hodnota
Jmenovité napětí stykače U_n	500 V
Jmenovitý kmitočet stykače f	50 Hz
Jmenovitý proud stykače I_n	160 A
Jmenovité napětí cívky elektromagnetu U_c	230 V
Jmenovitý kmitočet cívky elektromagnetu f_0	50 Hz
Kategorie užití stykače	AC3

7.2 Izolace

Dle tabulky 2.2 navrhujeme pro kategorii stykače B minimální povrchové cesty mezi živými částmi různé polarizity a živými částmi a kostrou.



Obrázek 7.1 Návrh izolačních vzdáleností proudovodné dráhy a připojovací svorky

Svorky pro připojení přírodních vodičů jsou navrženy v rozmezí 25 mm^2 až 95 mm^2 průřezu vodiče.

Minimální vzdušná vzdálenost pro kategorii B je 4 mm . Z tabulky 2.2 volíme pro kategorii B sloupec b, kde minimální hodnota povrchové cesty je 6 mm . Dále uvažujeme, že stykač bude mít ležatou polohu.

Základní úseky proudovodné dráhy se z počátku dimenzují, pro zatížení v rozsahu $2 - 4 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$.

Dimenzování přívodního pásu

Zvolíme si proudové zatížení $2 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$. Vypočteme minimální předběžný průřez přívodního pásu

$$S \geq \frac{I_n}{\sigma} = \frac{160}{2} = 80 \text{ mm}^2$$

Pro tento průřez zvolíme měděný pás o rozměrech $4 \times 21 \text{ mm}$.

Dimenzování kontaktního můstku

Pro kontaktní můstek můžeme zvolit průřez o rozměrech $9 \times 15 \text{ mm}$. Zmenšení průřezu měděného vodiče kontaktního můstku je snahou k docílení co nejmenších rozměrů přístroje.

Proudové zatížení můstku

$$\sigma = \frac{I_n}{S} = \frac{160}{3 \times 15} = 3,56 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Dimenzování kontaktu

Kontakt bude tvořit stříbrná destička o rozměrech $9 \times 14 \times 1,5 \text{ mm}$. Destička bude napevno připájená, jak na přívodním pásu, tak na kontaktním můstku. Povrch destičky je mírně válcovitě klenutý. Tento způsob vede k přímému styku.

7.2.3 Stykový odpor a tlak

Bezpečná velikost provozního stykového odporu, hodnota U_{sm} [6, str.35 tabulka 2–10]

$$R_s = \frac{U_{sm}}{2 \cdot I_n} = \frac{0,09}{2 \cdot 160} = 0,28 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Výpočet odporu na mezní hodnotě svaření kontaktů, hodnoty U_{ss} a C_k [6, str.35 tabulka 2–10]

$$R_{ss} = \frac{U_{ss}}{C_k \cdot I_k} = \frac{0,37}{1,16 \cdot 1600} = 199 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Minimální přitlačná síla F_1 jednoho kontaktu

Materiálová konstanta kontaktu Ag – Ag, $k = 4,5 \cdot 10^{-4}$ zvolena z tab 3.1

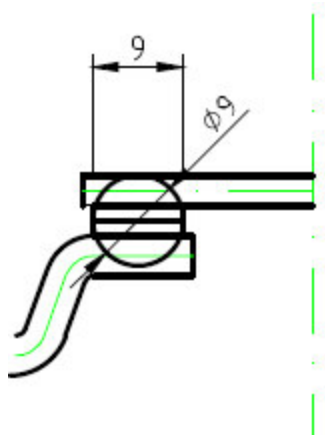
$$R_s = k \cdot F^{-n} \rightarrow F_1 = \left(\frac{k}{R_{ss}} \right)^{\frac{1}{n}} = \left(\frac{4,5 \cdot 10^{-4}}{1,99 \cdot 10^{-4}} \right)^{\frac{1}{0,5}} = 5,11 \text{ N}$$

Jelikož se kontaktní můstek skládá ze dvou kontaktů, musí F_{kmin} odpovídat

$$F_{kmin} = 2 \cdot F_1 = 2 \cdot 5,1 = 10,2 \text{ N}$$

7.3 Výpočet elektrodynamických sil

Síla v proudové úžině kontaktu F_u



Obrázek 7.3 Detail polokoviny kontaktního můstku

Náhradní průměr polokoule

$$D_i \approx \sqrt{A \cdot B} = \sqrt{9 \cdot 14} = 11,22 \text{ mm}$$

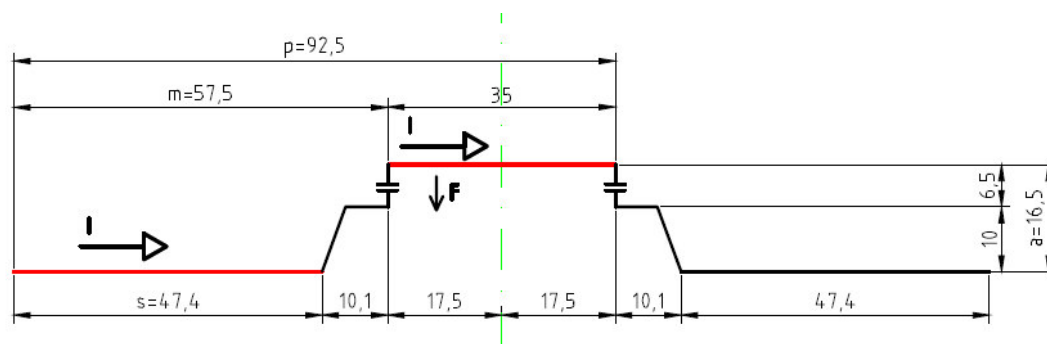
Idealizovaný průměr kruhové dotykové plochy

$$d = \sqrt{\frac{4F_1}{\pi H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 5,1}{\pi \cdot 4 \cdot 10^8}} = 1,27 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 0,13 \text{ mm}$$

Odpudivá síla v jedné úžině

$$F_u = 10^{-7} \cdot I_d^2 \cdot \ln \frac{D_i}{d} = 10^{-7} \cdot 3200^2 \cdot \ln \frac{11,22}{0,13} = 4,59 \text{ N}$$

Síla F_D v záhybech kontaktního můstku



Obrázek 7.4 Rovnoběžné úseky proudovodné dráhy

Tabulka 7.2 Parametry dílčích úseků kontaktního můstku

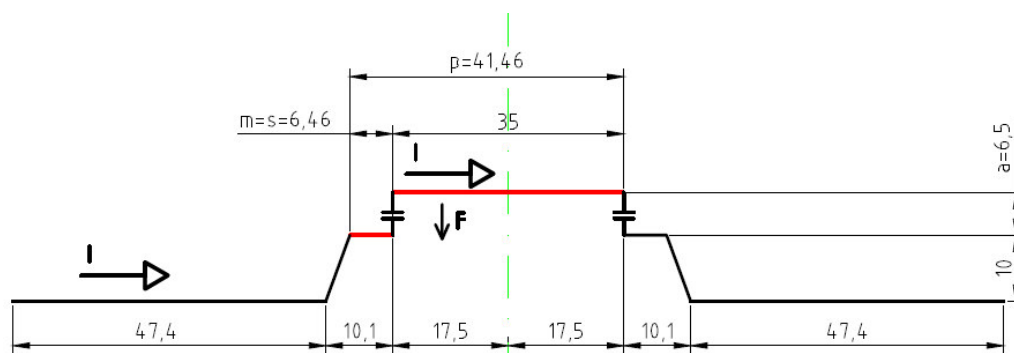
p [mm]	n [mm]	a [mm]	s [mm]	m [mm]
92,5	0	16,5	47,4	57,5

$$\begin{aligned}
F_{d1} &= 10^{-7} I_d^2 \left[\sqrt{\left(\frac{p-n}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{p-s}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{m-n}{a}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{m-s}{a}\right)^2 + 1} \right] \\
&= 10^{-7} 3200^2 \left[\sqrt{\left(\frac{92,5-0}{16,5}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{92,5-47,4}{16,5}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{57,5-0}{16,5}\right)^2 + 1} \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{\left(\frac{57,5-47,4}{16,5}\right)^2 + 1} \right] = 0,34 \text{ N}
\end{aligned}$$

Na kontaktní můstek působí síla dvou přívodů, proto výsledná síla bude rovna

$$F_d = 2 \cdot F_{d1} = 0,68 \text{ N}$$

Působící odpudivá síla F_R mezi můstkem a rovnoběžnými úseky vodiče



Obrázek 7.5 Rovnoběžné úseky proudovodné dráhy

Tabulka 7.3 Parametry dílčích úseků kontaktního můstku

p [mm]	n [mm]	a [mm]	s [mm]	m [mm]
41,5	0	6,56	6,46	6,46

$$\begin{aligned}
F_{R1} &= 10^{-7} I_d^2 \left[\sqrt{\left(\frac{p-n}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{p-s}{a}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{m-n}{a}\right)^2 + 1} + \sqrt{\left(\frac{m-s}{a}\right)^2 + 1} \right] \\
&= 10^{-7} 3200^2 \left[\sqrt{\left(\frac{41,5-0}{6,56}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{41,5-7}{6,56}\right)^2 + 1} - \sqrt{\left(\frac{6,46-0}{6,56}\right)^2 + 1} \right. \\
&\quad \left. + \sqrt{\left(\frac{6,46-6,46}{6,56}\right)^2 + 1} \right] = 0,58 \text{ N}
\end{aligned}$$

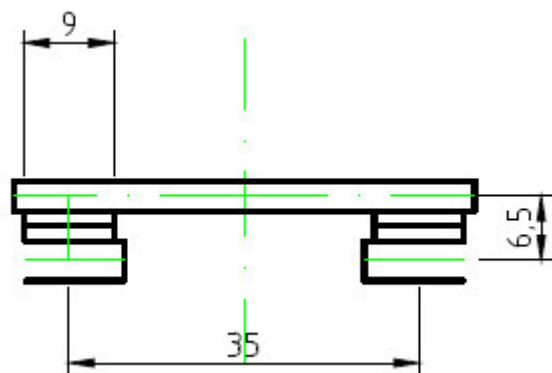
Z důvodu působící odpudivé síly dvou krátkých úseků je výsledná působící síla rovna

$$F_R = 2 \cdot F_{R1} = 1,16 \text{ N}$$

Odpudivá síla F_U , složená kontaktním můstkem a kolmými úseky kontaktních destiček

Na obrázku 7.6 je znázorněn U-záhyb. U-záhyb je tvořen kontaktním můstkem a kontaktními destičkami, které jsou napájeny kolmo ke kontaktnímu můstku.

Šířka kontaktní destičky $a = 9 \text{ mm}$, výška kontaktu $h = 6,5 \text{ mm}$ a vzdálenost os kontaktů $l_1 = 36 \text{ mm}$. Kdybychom předpokládali dokonalou stykovou plochu kontaktů, platí že $a' = 9 \text{ mm}$. Jelikož v praxi nedochází k dokonalé stykové ploše, dochází k zmenšení průměrné šířky kontaktu.



Obrázek 7.6 Detail kontaktního můstku

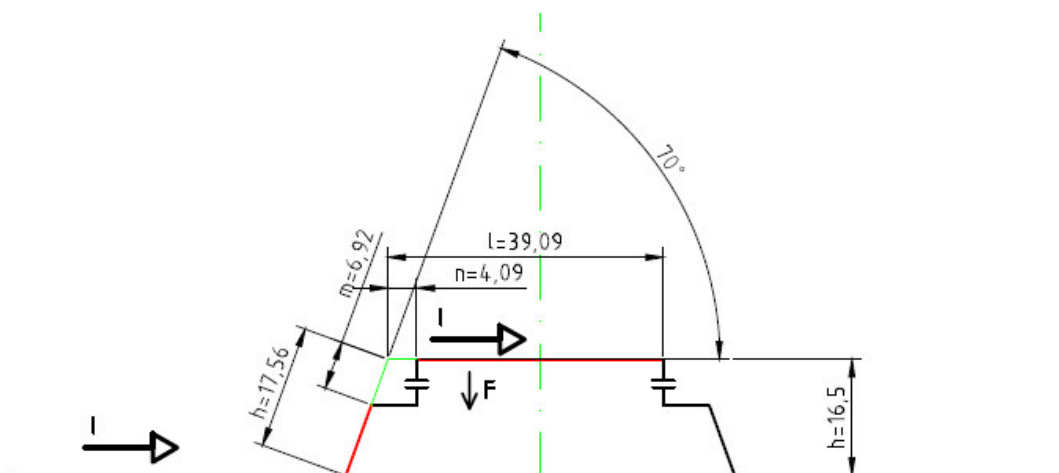
$$a' = a \cdot 0,65 = 9 \cdot 0,65 = 5,85 \text{ mm}$$

$$l = l_1 - \frac{a}{2} = 35 - \frac{5,9}{2} = 32,08 \text{ mm}$$

$$F_U = 2 \cdot 10^{-7} I_d^2 \cdot \ln \frac{2l}{a} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + h^2} + h}{\sqrt{l^2 + h^2} + h}$$

$$= 2 \cdot 10^{-7} \cdot 3200^2 \cdot \ln \frac{2 \cdot 32,08}{5,85} \cdot \frac{\sqrt{\left(\frac{5,85}{2}\right)^2 + 6,5^2} + 6,5}{\sqrt{32,08^2 + 6,5^2} + 6,5} = 1,7 \text{ N}$$

Síla F_L působící mezi nespojitými úseky vodičů



Obrázek 7.7 Nespojité úseky proudovodné dráhy

Tabulka 7.4 Parametry dílčích úseků kontaktního můstku

h [mm]	m [mm]	l [mm]	α [°]	n [mm]
17,56	6,92	39,09	70	4,09

Vypočteme síly na nespojitém úseku vodiče v úhlu, kde nejprve vypočteme pomocné parametry

$$\begin{aligned}
 a &= \sqrt{l^2 + h^2 + 2lh \cdot \cos \alpha + h \cdot \cos \alpha + l} \\
 &= \sqrt{39,09^2 + 17,56^2 + 2 \cdot 39,09 \cdot 17,56 \cdot \cos 70 + 17,56 \cdot \cos 70 + 39,09} \\
 &= 93,12 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b &= \sqrt{l^2 + h^2 + 2lh \cdot \cos \alpha + l \cdot \cos \alpha + h} \\
 &= \sqrt{39,09^2 + 17,56^2 + 2 \cdot 39,09 \cdot 17,56 \cdot \cos 70 + 39,09 \cdot \cos 70 + 17,56} \\
 &= 78,95 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 c &= \sqrt{n^2 + h^2 + 2nh \cdot \cos \alpha + l \cdot \cos \alpha + n} \\
 &= \sqrt{4,09^2 + 17,56^2 + 2 \cdot 4,09 \cdot 17,56 \cdot \cos 70 + 17,56 \cdot \cos 70 + 4,09} \\
 &= 36,80 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 d &= \sqrt{n^2 + h^2 + 2nh \cdot \cos \alpha + n \cdot \cos \alpha + h} \\
 &= \sqrt{4,09^2 + 17,56^2 + 2 \cdot 4,09 \cdot 17,56 \cdot \cos 70 + 4,09 \cdot \cos 70 + 17,56} \\
 &= 38,30 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 r &= \sqrt{n^2 + m^2 + 2nm \cdot \cos \alpha + n \cdot \cos \alpha + m} \\
 &= \sqrt{4,09^2 + 6,92^2 + 2 \cdot 4,09 \cdot 6,92 \cdot \cos 70 + 4,09 \cdot \cos 70 + 6,92} \\
 &= 17,48 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 s &= \sqrt{l^2 + m^2 + 2lm \cdot \cos \alpha + m \cdot \cos \alpha + l} \\
 &= \sqrt{39,09^2 + 6,92^2 + 2 \cdot 39,09 \cdot 6,92 \cdot \cos 70 + 6,92 \cdot \cos 70 + 39,09} \\
 &= 83,42 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 t &= \sqrt{n^2 + m^2 + 2nm \cdot \cos \alpha + m \cdot \cos \alpha + n} \\
 &= \sqrt{4,09^2 + 6,92^2 + 2 \cdot 4,09 \cdot 6,92 \cdot \cos 70 + 6,92 \cdot \cos 70 + 4,09} \\
 &= 15,62 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 u &= \sqrt{n^2 + m^2 + 2nm \cdot \cos \alpha + n \cdot \cos \alpha + m} \\
 &= \sqrt{4,09^2 + 6,92^2 + 2 \cdot 4,09 \cdot 6,92 \cdot \cos 70 + 4,09 \cdot \cos 70 + 6,92} \\
 &= 17,48 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Výsledná síla F_l nespojitých úseků pod úhlem

$$\begin{aligned}
 F_l &= 10^{-7} \frac{I_1 I_2}{\sin \alpha} \left(\ln \frac{d \cdot r}{b \cdot u} - \cos \alpha \cdot \ln \frac{c \cdot s}{a \cdot t} \right) \\
 &= 10^{-7} \frac{3200^2}{\sin 70} \left(\ln \frac{38,30 \cdot 17,48}{78,95 \cdot 17,48} - \cos 70 \cdot \ln \frac{36,80 \cdot 83,42}{93,12 \cdot 15,62} \right) \\
 &= -2,14 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Součet všech elektrodynamických sil, které působí na kontaktní můstek

Tabulka 7.5 Vypočtené elektrodynamické síly v proudové dráze

Síla v proudové úžině $2F_u$	-9,18	N
Síla v záhybech kontaktního můstku F_D	0,68	N
Působící odpudivá síla rovnoběžných úseků F_R	1,16	N
Odpudivá síla v U-záhybu F_U	-1,7	N
Síla působící mezi nespojitými úseky vodičů F_L	-2,14	N
Součet elektrodynamických sil působící v kontaktní úžině F_E	-11,18	N

7.4 Přítlačné pružiny kontaktního můstku

Podle tabulky 7.5 nám výsledná elektrodynamická síla při zkratu působí proti pružině. Musíme tedy vypočítat minimální sílu pružiny k_b koeficient bezpečnosti volíme 2,5.

Sestavíme pracovní diagram pružiny.

$$F_0 = k_b \cdot F_{kmin} + F_E = 2,5 \cdot 10,2 + 11,18 \doteq 37 \text{ N}$$

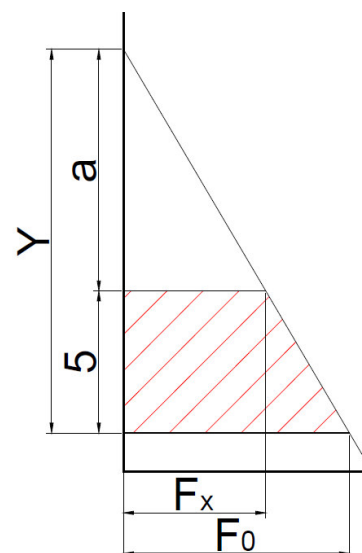
$$F_x \approx \frac{2}{3} F_0 = \frac{2}{3} \cdot 37 \doteq 25 \text{ N}$$

Pracovní zdvih pružiny je zvolen 5 mm

$$\frac{l+5}{l} = \frac{F_0}{F_x} \rightarrow a = \frac{5 \cdot F_x}{F_0 - F_x} = \frac{5 \cdot 25}{37 - 25} \doteq 10 \text{ mm}$$

Zatížení pružiny při plném stlačení

$$Y = a + 5 = 10 + 5 = 15 \text{ mm}$$



Obrázek 7.8 Pracovní diagram kontaktní pružiny

Zvolíme poměr A mezi středním průměrem drátu pružiny d a průměrem pružiny D_s

$$A = \frac{D_s}{d} = 10$$

Pro zvolený poměr A vypočítáme korekční činitel φ

$$\varphi = \frac{A - 0,25}{A - 1} + \frac{0,625}{A} = \frac{10 - 0,25}{10 - 1} + \frac{0,625}{10} \doteq 1,15$$

Dovolené namáhání ve smyku

Z tabulky drátů uvedené v literatuře [6, str.69 tabulka 3-1] je stanoveno σ_{pt} pro běžné namáhání, při přibližném průměru drátu 1 mm. Dále jsme stanovili činitel μ z literatury [6, str.69 tabulka 3-2] pro pracovní režim pružiny (trvale 10 zdvihů za minutu), při pracovní teplotě pružiny 100°C. Z těchto hodnot jsme dopočítali dovolené namáhání ve smyku

$$\tau_D = \frac{6_{pt}}{1,6 \cdot \mu} = \frac{2300}{1,6 \cdot 3} = 479,2 \doteq 480 \text{ MPa}$$

Stanovíme průměr drátu pružiny

$$d = \sqrt[3]{\frac{8 \cdot F_0 \cdot D_s \cdot \varphi}{\tau_D \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{8 \cdot F_0 \cdot A \cdot \varphi}{\tau_D \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 37 \cdot 10 \cdot 1,15}{480 \cdot 10^6 \cdot \pi}} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Dle tabulky uvedené v literatuře [6, str.69 tabulka 3–I] volíme nejbližší možný vyšší průměr $d' = 1,6 \text{ mm}$

Střední průměr pružiny

$$D_s = A \cdot d = 10 \cdot 1,6 = 16 \text{ mm}$$

Výpočet počtu činných závitů (modul pružnosti pro tažný patentovaný drát z nelegované oceli $G = 80,5 \cdot 10^3 \text{ MPa}$)

$$n' = \frac{Y \cdot G \cdot d^4}{8 D_s F_0} = \frac{15 \cdot 80,5 \cdot 10^9 \cdot (1,6 \cdot 10^{-3})^4}{8 \cdot 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot 37} \doteq 16,71 \doteq 17 \text{ závitů}$$

K pružině se musí přičíst závěrné závity, takže celkový počet závitů pružiny bude $z = 19$. Závity pružiny nesmí v žádném případě dosednou na sebe. Takže dosedovou délku musíme zvětšit o 8 – 15 %.

Stlačená délka pružiny

$$L_g = (1,08 + 1,15)^2 z \cdot d' = 1,08^2 \cdot 19 \cdot 1,6 \doteq 35 \text{ mm}$$

Délka pružiny ve volném stavu L_0

$$L_0 = L_g + Y = 35 + 15 = 50 \text{ mm}$$

Stoupání závitů pružiny

$$s = \frac{L_0 - n_z \cdot d'}{n'} = \frac{50 - 2 \cdot 1,6}{17} = 2,75 \text{ mm}$$

8 Výpočet oteplení jmenovitým proudem

8.1 Výpočet odporu jednotlivých částí proudovodné dráhy

- Výpočet měrného odporu v závislosti na odhadovaném oteplení

Stykač má proudovodnou dráhu vyrobenou z elektrovodné mědi o čistotě 99,9 %.

Parametry elektrovodné mědi

Teplota okolí $T_o = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Zvolené předpokládané oteplení $\theta = 50\text{ K}$

Rezistivita mědi při $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\rho_{20} = 16,8 \cdot 10^{-9}\text{ }\Omega \cdot \text{m}^{-1}$

Teplotní součinitel mědi $\alpha = 0,0036\text{ K}^{-1}$

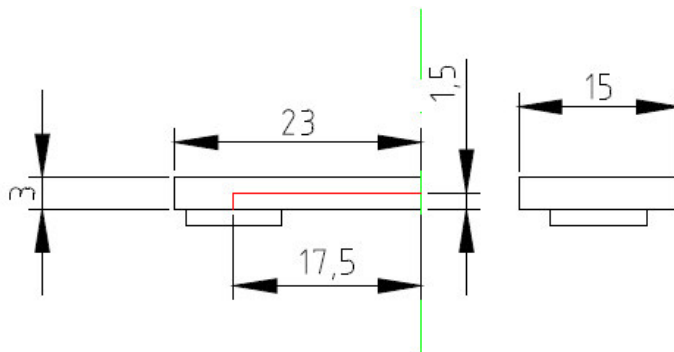
Rezistivita mědi pro teplotu okolí $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\rho_{40} = \rho_{20}(1 + \alpha \cdot (T_o - T)) = 16,8 \cdot 10^{-9}(1 + (0,0036 \cdot 20)) \doteq 19,2 \cdot 10^{-9}\text{ }\Omega \cdot \text{m}^{-1}$$

Rezistivita mědi pro předpokládané oteplení

$$\rho_{cu} = \rho_{40}(1 + \alpha \cdot \theta) = 19,2 \cdot 10^{-9}(1 + 0,0036 \cdot 50) = 22,7 \cdot 10^{-9}\text{ }\Omega \cdot \text{m}^{-1}$$

- Elektrický odpor kontaktního můstku



Obrázek 8.1 Rozměry kontaktního můstku

Délka střední proudučáry k místě styku $l_1 = 19\text{ mm} = 19 \cdot 10^{-3}\text{ m}$

Průřez kontaktního můstku $S_1 = 3 \times 15 = 45 \cdot 10^{-6}\text{ m}^2$

Odpor pásku

$$R_1 = \rho_{cu} \frac{l_1}{S_1} = 22,7 \cdot 10^{-9} \cdot 10^{-9} \frac{19 \cdot 10^{-3}}{45 \cdot 10^{-6}} \doteq 9,58 \cdot 10^{-6}\text{ }\Omega$$

- Skutečný elektrický odpor hlavního kontaktu

Konstanta pro kombinaci materiálů kontaktů

$$k = 4,5 \cdot 10^{-4}$$

Druh styku kontaktů

$$n = 0,5$$

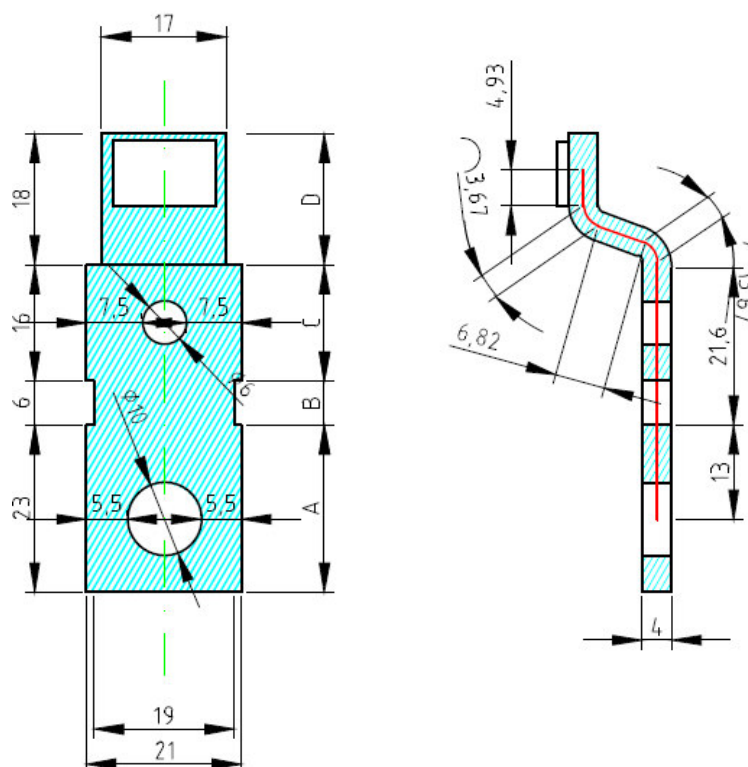
Síla působící na jeden kontakt

$$F_{k1} = \frac{F_K}{2} = \frac{37}{2} = 18,5 \text{ N}$$

Stykový odpor

$$R_s = k \cdot F_{k1}^{-n} = 4,5 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\sqrt{16,77}} = 1,1 \cdot 10^{-4} \Omega$$

- Výpočet elektrického odporu přívodního pásu



Obrázek 8.2 Přívodní pásek stykače

Délka střední proudočáry uvnitř stykače je charakterizována úseky B, C, D

$$l_A = 21,6 + 2 \cdot 3,67 + 6,82 + 4,93 \doteq 40,7 \text{ mm} = 40,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Délka střední proudočáry vně stykače je charakterizována úsekem A

$$l_B = 13 \text{ mm} = 13 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Průřez vodiče

$$S_2 = 4 \times 21 = 84 \text{ mm}^2 = 84 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Vypočteme činitele zvýšení odporu v závislosti na tvaru navrhnuté konstrukce na obrázku 8.2.

Úsek A

Činitele zúžení zanedbáme

Úsek B

$b = 21 \text{ mm}$

$a = 19 \text{ mm}$

$\frac{a}{b} = \frac{19}{21} = 0,9$

$K_B = 1,02$

Úsek C

$b = 21 \text{ mm}$

$a = b - \phi = 21 - 6 = 15 \text{ mm}$

$\frac{a}{b} = \frac{15}{21} = 0,7$

$K_C = 1,38$

Úsek D

$b = 21 \text{ mm}$

$a = 17 \text{ mm}$

$\frac{a}{b} = \frac{17}{21} = 0,8$

$K_D = 1,05$

Vypočteme odpor úseku A

$$R_B = \rho_{cu} \cdot \frac{l_b}{S_2} = 22,7 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{13 \cdot 10^{-3}}{84 \cdot 10^{-6}} = 3,51 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Vypočteme odpor úseků B, C, D

$$\begin{aligned} R_A &= \frac{\rho_{cu}}{S_2} [l_a - b + b \cdot (K_B + K_C + K_D - 3)] \\ &= \frac{22,7 \cdot 10^{-9}}{84 \cdot 10^{-6}} [40,7 \cdot 10^{-3} - 21 \cdot 10^{-3} + 21 \cdot 10^{-3} \cdot (1,02 + 1,38 + 1,05 - 3)] \\ &= 7,87 \cdot 10^{-6} \Omega \end{aligned}$$

8.1.1 Vypočet přítláčné síly šroubového spoje

Připojovací šroub proudového spoje pro připojení přívodních vodičů je realizován šroubem M12.

Dovolené namáhání materiálu

$6_d = 30 \text{ MPa}$

Průměr jádra

$d_j = 10,2 \text{ mm} \doteq 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Plošný styk

$n = 1$

Materiálová konstanta

$k = 5 \cdot 10^{-3}$ (pozn. pro kombinaci materiálů)

Přítláčná síla

$$F_P' = 6_d \frac{\pi d_j^2}{4} = 30 \cdot 10^6 \frac{\pi \cdot (10 \cdot 10^{-3})^2}{4} \doteq 2451 \text{ N}$$

V provozu se přítláčná síla zmenšuje vlivem teploty o 30 až 50 %. Provede se přepočet

$$F_P \approx 0,3 F_P' = 0,3 \cdot 2451 = 735 \text{ N}$$

Výsledný odpor proudového spoje bude

$$R_s = \frac{k}{F^n} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{735} = 6,8 \cdot 10^{-6} \Omega$$

8.1.2 Výpočet náhradního schématu přívodu proudu

Přívodní vodič z mědi o průřezu $S_{cu} = 95 \text{ mm}^2$

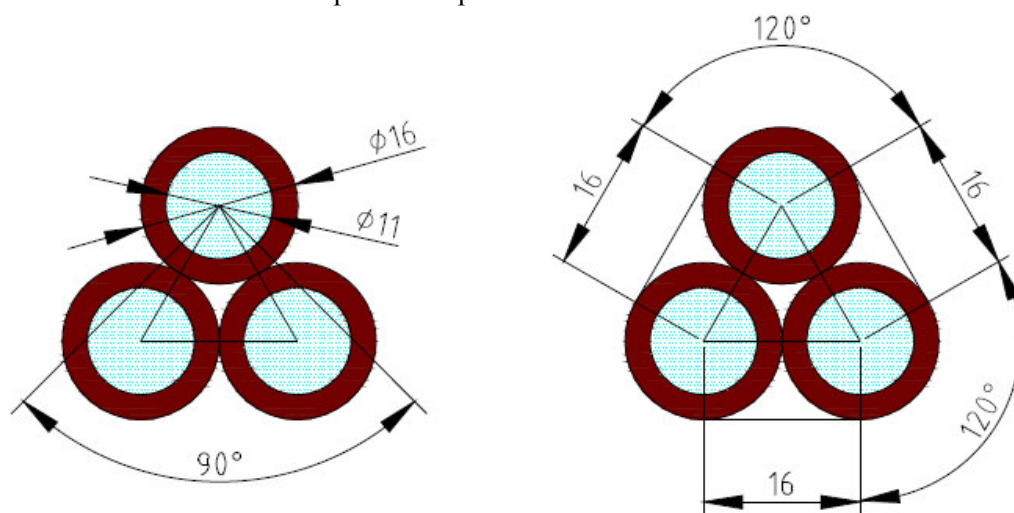
Vypočteme průměr měděného vodiče

$$d_{cu} = \sqrt{\frac{S \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{95 \cdot 4}{\pi}} = 10,99 \div 11 \text{ mm}$$

Tloušťka izolace vodiče $d_{il} = 2,5 \text{ mm}$

Vnější průměr izolovaného vodiče $d_i = d_{cu} + 2 \cdot d_{il} = 11 + 2 \cdot 2,5 = 16 \text{ mm}$

Přívodní vodiče mohou být samostatně nebo ve svazku. Pro výpočet je důležité počítat s nejhůře možným případem, proto budeme předpokládat, že vodiče jsou ve svazku a umístěny vodorovně. Tímto výpočtem docílíme zhoršení chladících podmínek přívodu.



Obrázek 8.3 Znáznornění chladícího obvodu svazkového vodiče

Při výpočtu chladícího obvodu vodiče ve svazku se uvažuje jen s $\frac{3}{4}$ obvodu vodiče, protože ve zbývajících $\frac{1}{4}$ vodiče odvod tepla konvencí zaniká.

Obvod svazku, odvádějící teplo konvencí

$$O_k = 3 \frac{3}{4} \pi \cdot d_i = 3 \frac{3}{4} \pi \cdot 1,6 \cdot 10^{-2} = 0,11 \text{ m}$$

Obvod svazku, odvádějící teplo sáláním

$$O_z = 3d_i + 3 \frac{\pi d_i}{3} = 1,6 \cdot 10^{-2} (3 + \pi) = 98 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Určíme poměr obvodů

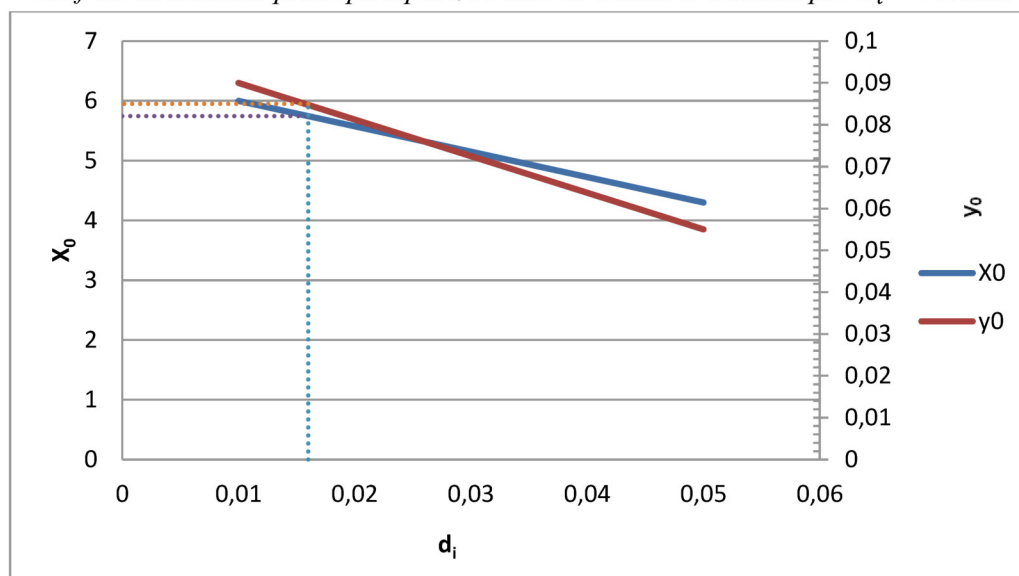
$$\frac{O_z}{O_k} = \frac{S_z}{S_k} = \frac{98 \cdot 10^{-3}}{0,11} \div 0,89$$

Odhadneme součinitel zmenšení chlazení

$$N = k_z \frac{S_z}{S_k} = 0,9 \cdot 0,89 \doteq 0,8$$

$$k_z = 0,9$$

Graf 8.1 Součinitele přestupu tepla z izolace do okolního vzduchu pro $d_i = 16 \text{ mm}$



Linearizovaný zápis odvodu tepla

$$\alpha_k = 5,75 + 0,085 \theta_p$$

interpolací mezi průměry 0,01 a 0,05

$$\alpha_z = 6,3 + 0,038 \theta_p$$

volíme pro $E_z = 0,9$

Součinitel přestupu tepla α_o

$$\begin{aligned} \alpha_o &= \alpha_k + N\alpha_z = 5,75 + 0,085 \theta_p + 0,8 \cdot (6,3 + 0,038 \theta_p) \\ &= 10,66 + 0,115 \theta_p = A + B\theta_p \end{aligned}$$

Vlastnosti izolačního pláště kabelu na 1 m délky

Délka kabelu $l = 1 \text{ m}$

Průměr měděného vodiče $d_{cu} = 11 \text{ mm}$

Průměr izolovaného vodiče $d_i = 16 \text{ mm}$

Teplotní vodivost $\lambda_{pl} = 0,3 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}$

Činitel chlazení obvodu $\eta = 0,75$

Teplotní vodivost mědi $\lambda_{cu} = 385 \text{ W} \cdot \text{km}^{-1}$

Tepelný odpor izolačního pláště

$$R_{T1} = \frac{\ln \frac{d_i}{d_{cu}}}{2\pi \lambda_{pl} l \eta} = \frac{\ln \frac{16}{11}}{2\pi \cdot 0,3 \cdot 1 \cdot 0,75} = 0,265 \text{ kW}^{-1}$$

Určíme pomocnou veličinu, která určí vztah mezi oteplením povrchu izolace a oteplením vodiče

$$K = O_p \cdot l \cdot R_{T1} = \frac{O_k}{3} \cdot l \cdot R_{T1} = \frac{0,11}{3} \cdot 1 \cdot 0,265 = 9,72 \cdot 10^{-3}$$

Výpočet oteplení povrchu izolace θ_p při dovoleném oteplení přírodního vodiče $\theta_v = 20 \text{ K}$

$$\begin{aligned}\theta_p &= -\left(\frac{1 + AK}{2BK}\right) + \sqrt{\left(\frac{1 + AK}{2BK}\right)^2 + \frac{\theta_v}{BK}} \\ &= -\left(\frac{1 + 10,66 \cdot 9,72 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,115 \cdot 9,72 \cdot 10^{-3}}\right) + \sqrt{\left(\frac{1 + 10,66 \cdot 9,72 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,115 \cdot 9,72 \cdot 10^{-3}}\right)^2 + \frac{20}{0,115 \cdot 9,72 \cdot 10^{-3}}} \\ &= 17,8 \text{ K}\end{aligned}$$

Vypočteme měrnou chladivost izolace

$$\alpha_0 = A + B\theta_p = 10,66 + 0,115 \cdot 17,74 = 12,84 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-2}$$

Obvod vodiče O_v

$$O_v = 2\pi \cdot d_{cu} = 2\pi \cdot 1,1 \cdot 10^{-2} = 69 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Náhradní chladivost povrchu vodiče α_{on}

$$\alpha_{on} = \frac{1}{O_v \left(R_{T1} + \frac{1}{\alpha_0 O_p l}\right)} = \frac{1}{69 \cdot 10^{-3} \left(0,265 + \frac{1}{\frac{12,84 \cdot 0,11 \cdot 1}{3}}\right)} = 6,07 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-2}$$

Určení parametrů náhradního tepelného schématu přívodu

$$\delta = \sqrt{\alpha_{on} \cdot O_v \cdot \lambda_{cu} \cdot S_{cu}} = \sqrt{6,11 \cdot 6,91 \cdot 10^{-2} \cdot 385 \cdot 95 \cdot 10^{-6}} = 0,124$$

Velikost příčného odporu

$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta} = \frac{1}{0,124} \doteq 8,06 \text{ KW}^{-1}$$

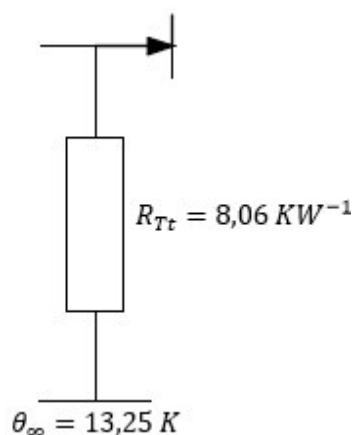
Dovolené oteplení přívodu

$$\theta_{\infty} = \frac{\rho_{cu-p} \cdot I^2}{\alpha_{on} \cdot O_v \cdot S_{cu}} = \frac{20,6 \cdot 10^{-9} \cdot 160^2}{6,07 \cdot 69 \cdot 10^{-3} \cdot 95 \cdot 10^{-6}} = 13,25 \text{ K}$$

Měrný odpor měděné tyče pro dovolené oteplení přívodu

$$\rho_{cu-p} = \rho_{40}(1 + \alpha \cdot \theta) = 19,2 \cdot 10^{-9} (1 + 0,0036 \cdot 20) = 20,6 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}^{-1}$$

Náhradní schéma přívodního vodiče



Obrázek 8.4 Náhradní schéma přívodního vodiče

8.1.3 Náhradní schéma svorkového spoje

Zvolíme si korekční činitel pro plošný styk $c = 0,8$

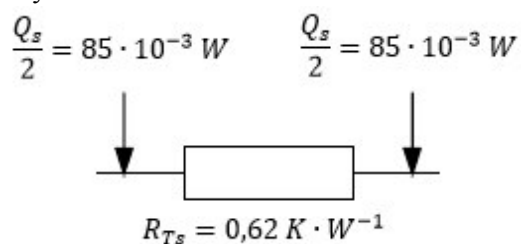
Pro oteplení $50K$ vypočteme podélný odpor R_{Ts}

$$R_{Ts} = \frac{c R_s}{\lambda_{Cu} \cdot \rho_{Cu}} = \frac{0,8 \cdot 6,8 \cdot 10^{-6}}{385 \cdot 22,7 \cdot 10^{-9}} = 0,62 K \cdot W^{-1}$$

Ztráty ve styku

$$Q_s = R_s \cdot I^2 = 6,8 \cdot 10^{-6} \cdot 160^2 = 0,17 W$$

Náhradní schéma svorky



Obrázek 8.5 Náhradní schéma svorkového spoje

8.1.4 Výpočet náhradního schématu přívodního pásku

První část pásku se svorkou umístěna vně stykače

Činitel stínění sousedních fází (odhadem) $N = 0,7$

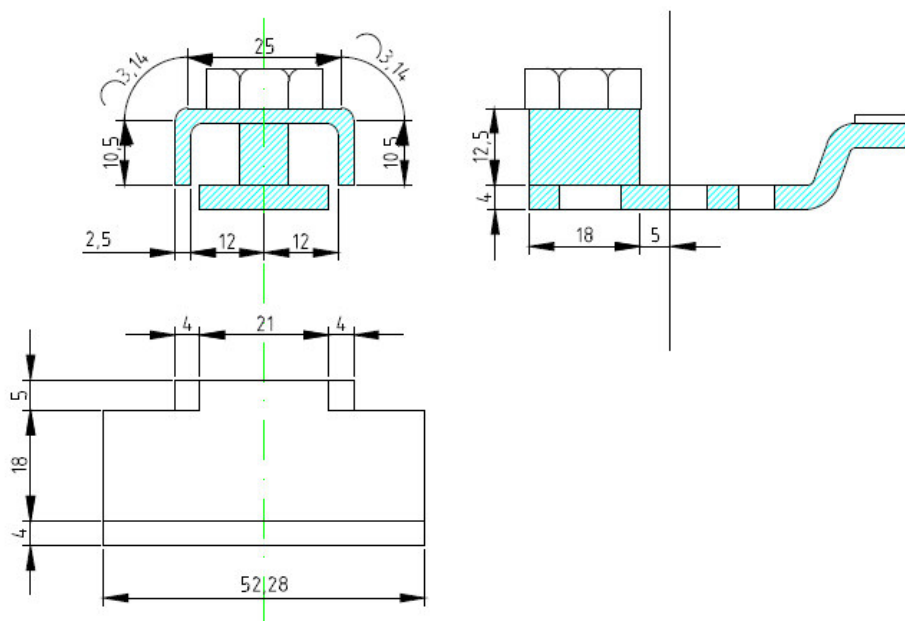
Relativní činitel sálání $E_z = 0,4$

Teplota okolí $T_0 = 40 ^\circ C$

Předpokládané oteplení $\theta_p = 50 K$

Chladicí délka

$$l_v = 23 \cdot 10^{-3} m$$



Obrázek 8.6 První část pásu umístěna vně stykače

Součinitel přestupu tepla zářením

$$\alpha_z = 2,8 + 0,017 \cdot \theta_p = 2,8 + 0,017 \cdot 50 = 3,65 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Součinitel přestupu tepla konvencí

Použijeme interpolaci hodnot střední hodnotu $h \sim 20 \text{ mm}$

$$\alpha_k = 4,3 + 0,055\theta$$

$$\alpha_k = 6 + 0,09\theta$$

Odečtením z grafu 8.1 dostaneme hodnotu součinitele přestupu tepla konvencí

$$\alpha_k = 5,6 + 0,081 \cdot \theta_p = 5,6 + 0,081 \cdot 50 = 9,65 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Součinitel chladiivosti povrchu je roven

$$\alpha_0 = N \cdot \alpha_z + \alpha_k = 0,7 \cdot 3,65 + 9,65 = 12,21 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Určíme chladicí povrch

$$P_v = (18 + 4) \cdot 52,28 + 29 \cdot 5 = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Chladicímu obvodu O_v je přiřazen průřez $S_v = 84 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ na chladicí délce l_v

$$O_v = \frac{P_v}{l_v} = \frac{1,3 \cdot 10^{-3}}{23 \cdot 10^{-3}} = 56,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Náhradní veličiny π -članku

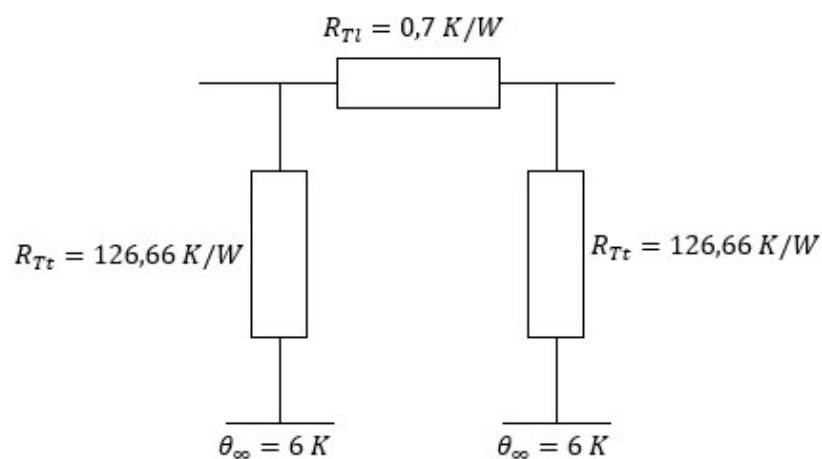
$$\beta l = l_v \sqrt{\frac{\alpha_0 \cdot O_v}{\lambda_{cu} \cdot S_v}} = 23 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{12,21 \cdot 56,3 \cdot 10^{-3}}{385 \cdot 84 \cdot 10^{-3}}} = 0,106$$

$$\delta = \sqrt{\alpha_0 \cdot O_v \cdot \lambda_{cu} \cdot S_v} = \sqrt{12,21 \cdot 56,3 \cdot 10^{-3} \cdot 385 \cdot 84 \cdot 10^{-6}} = 0,1491$$

$$R_{Tl} = \frac{\sinh \beta l}{\delta} = \frac{\sinh 0,106}{0,1491} = 0,71 \text{ KW}^{-1}$$

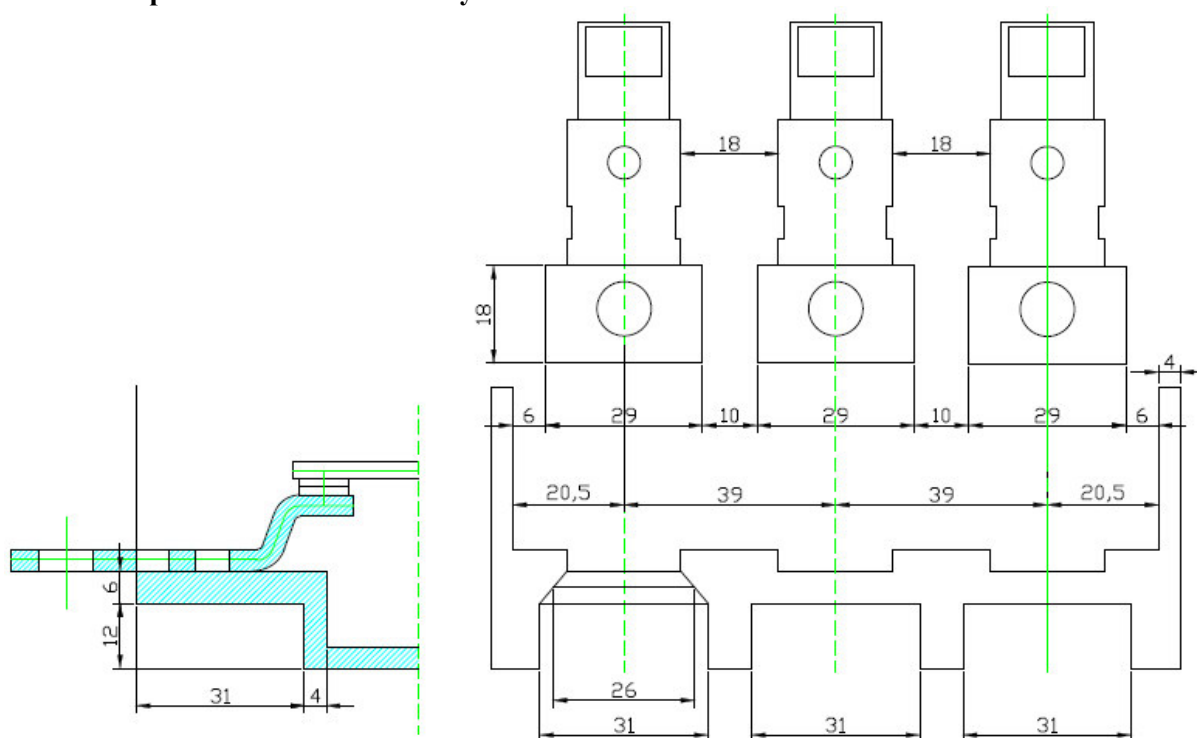
$$R_{Tt} = \frac{1}{\delta \cdot \tanh \frac{\beta l}{2}} = \frac{1}{0,15 \cdot \tanh \frac{0,106}{2}} \doteq 126 \text{ KW}^{-1}$$

$$\theta_{\infty} = \frac{R_B \cdot I^2}{\alpha_0 \cdot P_v} = \frac{3,51 \cdot 10^{-6} \cdot 160^2}{12,21 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3}} = 5,68 \doteq 6 \text{ K}$$



Obrázek 8.7 Náhradní schéma π -čláčku proudovodné dráhy umístěné vně stykače

Druhá část pásku umístěna uvnitř stykače



Obrázek 8.8 Druhá část pásku umístěna uvnitř stykače

Odváděné teplo povrchem bakelitu

$$P_v = (21 + 4 + 4) \cdot 35 = 1,02 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Střední průřez bakelitu

$$S_b = \frac{21 + 31}{2} \cdot 35 = 0,91 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Tepelný odpor bakelitu

$$R_{Tb} = \frac{l_b}{\lambda_b \cdot S_b} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot 0,91 \cdot 10^{-3}} \doteq 26 \text{ KW}^{-1}$$

Tepelný odpor vzduchové vrstvy

$$E_{z12} = \frac{1}{\frac{1}{E_{z1}} + \frac{1}{E_{z2}} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,8} - 1} = 0,67$$

Uzavřená plocha

$$S_v = 31 \cdot 35 = 1,09 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Stanovení měrné tepelné vodivosti vzduchu

$$\begin{aligned} \lambda'_{efv} &= 1,1\delta^{0,75} + 9E_{z12} \cdot \delta = 1,1 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,75 + 9 \cdot 0,67 \cdot 11 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,112 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1} \end{aligned}$$

Kde tepelný odpor vzduchové vrstvy je

$$R_{Tv} = \frac{l_v}{\lambda_{efv} + S_v} = \frac{12 \cdot 10^{-3}}{0,112 \cdot 1,09 \cdot 10^{-3}} \doteq 98 \text{ KW}^{-1}$$

Chladivost bakelitové stěny panelu je

$$\alpha_0 = N \cdot \alpha_z + \alpha_k = 1 \cdot (5,6 + 0,034\theta_p) + (3 + 0,03\theta_p) = 8,6 + 0,064\theta_p$$

Pomocná veličina K

$$K = O \cdot l \cdot \sum R_T = 31 \cdot 10^{-3} \cdot 31 \cdot 10^{-3} \cdot (98 + 26) = 0,119$$

Při předpokládaném oteplení pásu $\theta_v = 50K$ je oteplení povrchu θ_p rovno

$$\theta_p = -\left(\frac{1 + AK}{2BK}\right) + \sqrt{\left(\frac{1 + AK}{2BK}\right)^2 + \frac{\theta_v}{BK}} = 22,8 \text{ K}$$

Stanovení chladivosti bakelitové stěny

$$\alpha_0 = N \cdot \alpha_z + \alpha_k = 8,6 + 0,064 \cdot 15,6 = 10,1 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Pro odhadnutou chladivost provedeme přepočítání efektivní vodivosti vzduchu

$$Q = \alpha_0 \cdot O \cdot l \cdot \theta_p = 10,1 \cdot 31 \cdot 10^{-3} \cdot 31 \cdot 10^{-3} \cdot 22,8 = 0,221 \text{ W}$$

$$T_2 = T_0 + \theta_p = 40 + 22,8 = 62,8 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow 335,8 \text{ K}$$

$$T_1 = T_2 + Q \cdot R_{Tv} = 62,8 + 0,221 \cdot 98 = 84,5 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow 357,5 \text{ K}$$

$$T_S = 0,5(T_1 + T_2) = 0,5(62,8 + 84,5) = 73,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ze střední teploty T_S zvolíme hodnotu $C_V = 0,4494$ [6, str.53 graf 2-45]

$$\begin{aligned} \lambda_{ev} &= C_V \cdot \delta^{0,75} (T_1 - T_2)^{0,25} = 0,4494 \cdot 12 \cdot 10^{-3} \cdot 0,75 \cdot (84,5 - 62,8)^{0,25} \\ &= 0,0352 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_z &= 5,7 \cdot 10^{-8} E_{z12} \cdot (T_1^2 + T_2^2) \cdot (T_1 + T_2) \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} 0,677 \cdot (357,5^2 + 335,8^2) \cdot (357,5 + 335,8) \\ &= 6,37 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1} \end{aligned}$$

Skutečná vypočtená ekvipotenciální vodivost vzduchu

$$\lambda_{efv} = \lambda_{ev} + \alpha_z \cdot \delta = 0,0352 + 6,37 \cdot 12 \cdot 10^{-3} = 0,112 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

Chyba předběžného výpočtu nesmí přesáhnout 5 %.

$$|\Delta\%| = 100 \cdot \frac{\lambda'_{efv} - \lambda_{efv}}{\lambda_{efv}} = 100 \cdot \frac{0,112 - 0,112}{0,112} = 0 \%$$

Výpočet náhradní chladivosti povrchu α_{on}

$$\begin{aligned} \alpha_{on} &= \frac{1}{P_v \left(\sum R_T + \frac{1}{\alpha_o \cdot O \cdot l} \right)} = \frac{1}{1,02 \cdot 10^{-3} \left(124 + \frac{1}{10,1 \cdot 0,96 \cdot 10^{-3}} \right)} \\ &= 4,34 \text{ Wm}^2\text{K}^{-1} \end{aligned}$$

Náhradní veličiny π -článku

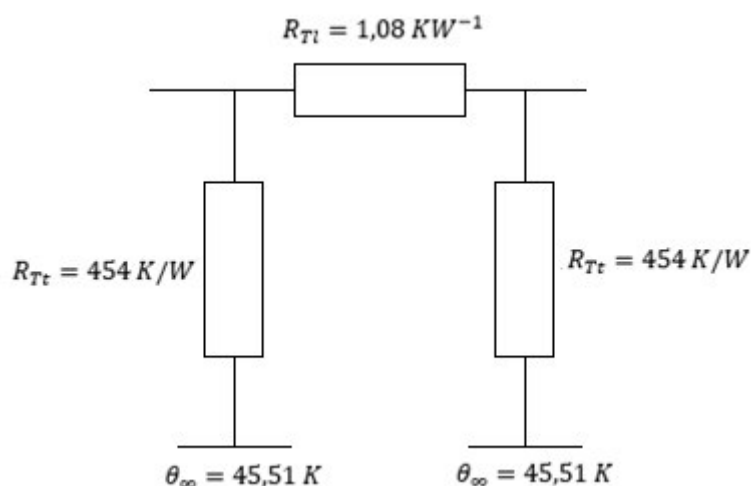
$$\beta l = l_v \sqrt{\frac{\alpha_{on} \cdot O_v}{\lambda_{cu} \cdot S_I}} = 26,3 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{4,34 \cdot 29 \cdot 10^{-3}}{385 \cdot 84 \cdot 10^{-6}}} = 0,069$$

$$R_{Tl} = \frac{l_v}{\lambda_{cu} \cdot S_I} = \frac{35 \cdot 10^{-3}}{385 \cdot 84 \cdot 10^{-6}} = 1,08 \text{ KW}^{-1}$$

$$R_{Tt} = \frac{2}{\alpha_{on} \cdot P_v} = \frac{2}{4,34 \cdot 1,02 \cdot 10^{-3}} = 454 \text{ KW}^{-1}$$

$$\theta_{\infty} = \frac{R_A \cdot I^2}{\alpha_{on} \cdot P_v} = \frac{7,87 \cdot 10^{-6} \cdot 160^2}{4,34 \cdot 1,02 \cdot 10^{-3}} = 45,51 \text{ K}$$

Náhradní veličiny π -článku



Obrázek 8.9 Náhradní schéma π -článku proudovodné dráhy, umístěné uvnitř stykače

8.1.5 Náhradní schéma hlavního kontaktu

Vliv přestupu tepla v kontaktním styku $c = 0,8$

Odpor kontaktu $R_s = 110 \cdot 10^{-6} \Omega$

Teplotní vodivost stříbra $\lambda_{Ag} = 418 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

Oteplení $\theta = 50 \text{ K}$

Teplotní součinitel $\alpha = 0,0036 \text{ K}^{-1}$

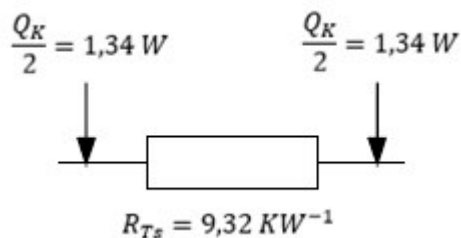
Příčný odpor náhradního teplotního schématu

$$R_{Ts} = \frac{cR_s}{\lambda_{Ag}\rho_{Ag}(1 + \alpha\theta)} = \frac{0,8 \cdot 110 \cdot 10^{-6}}{418 \cdot 18,2 \cdot 10^{-9}(1 + 0,0036 \cdot 50)} = 9,32 \text{ KW}^{-1}$$

Kde ztráty na styku jsou rovny

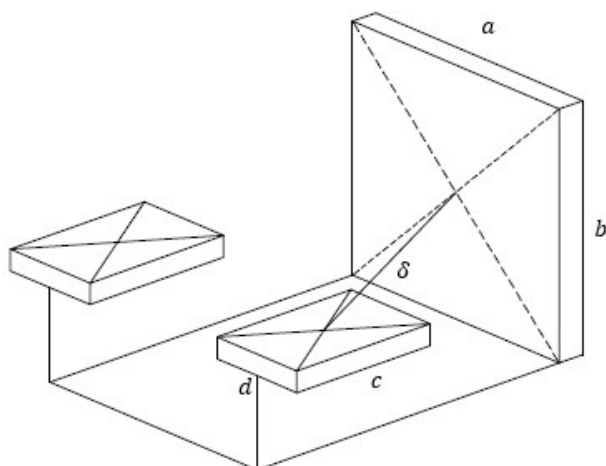
$$Q_K = R_s \cdot I^2 = 110 \cdot 10^{-6} \cdot 160^2 = 2,68 \text{ W}$$

Náhradní schéma podélného odporu



Obrázek 8.10 Náhradní schéma podélného odporu kontaktního můstku

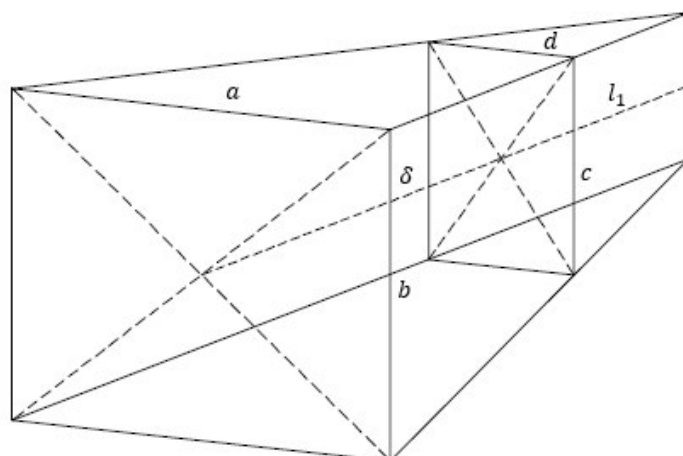
8.1.6 Náhradní schéma kontaktního můstku



Obrázek 8.11 Vyobrazení dráhy od kontaktního můstku k bakelitové stěně

Hodnoty z obrázku 8.11

Střední délka dráhy mezi můstkem a bakelitovou stěnou	$\delta \doteq 43 \text{ mm}$
Šířka bakelitové stěny	$a = 39 \text{ mm}$
Výška bakelitové stěny	$b = 50 \text{ mm}$
Délka kontaktního můstku	$c = 23 \text{ mm}$
Šířka kontaktního můstku	$d = 15 \text{ mm}$



Obrázek 8.12 Sestavený nepravidelný jehlan

Idealizování nepravidelného jehlanu na pravidelný kolmý jehlan

Idealizování rozměrů základny jehlanu

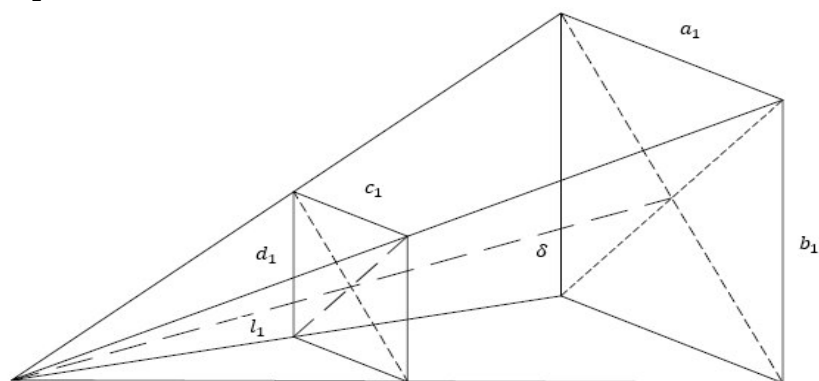
$$a_1 = b_1 = \sqrt{a \cdot b} = \sqrt{39 \cdot 50} = 44,16 \doteq 45 \text{ mm}$$

Idealizování rozměru jehlanu na konci známé střední dráhy

$$c_1 = d_1 = \sqrt{c \cdot d} = \sqrt{23 \cdot 15} = 18,57 \doteq 19 \text{ mm}$$

Výpočet délky l_1

$$l_1 = \frac{\delta \cdot c_1}{a_1 - c_1} = \frac{43 \cdot 19}{45 - 19} = 31,4 \doteq 31 \text{ mm}$$



Obrázek 8.13 Idealizovaný jehlan

Určíme vzájemnou emisivitu mezi vodičem a bakelitem, kde pro vodič je $E_{z1} = 0,9$ a pro bakelit $E_{z2} = 0,8$

$$E_{z12} = \frac{1}{\frac{1}{E_{z1}} + \frac{1}{E_{z2}} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0,9} + \frac{1}{0,8} - 1} = 0,735$$

Efektivní vodivost vzduchové vrstvy λ'_{efv}

$$\begin{aligned}\lambda'_{efv} &\approx 1,1\delta^{0,75} + 9E_{z12} \frac{l_1\delta}{\delta + l_1} \\ &= 1,1 \cdot 43 \cdot 10^{-3 \cdot 0,75} + 9 \cdot 0,735 \cdot \frac{31 \cdot 10^{-3} \cdot 43 \cdot 10^{-3}}{(43 + 31) \cdot 10^{-3}} = 0,223 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}\end{aligned}$$

Tepelný odpor vzduchové vrstvy

$$R_{TJ} = \frac{(\delta + l_1)\delta}{\lambda'_{efv} \cdot b_1 \cdot a_1 \cdot l_1} = \frac{(43 \cdot 10^{-3} + 31 \cdot 10^{-3}) \cdot 43 \cdot 10^{-3}}{0,223 \cdot (45 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 31 \cdot 10^{-3}} = 227 \text{ KW}^{-1}$$

Tepelný odpor bakelitové stěny

$$R_{Tb} = \frac{l_b}{\lambda_b \cdot S_b} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{0,25 \cdot (45 \cdot 10^{-3})^2} = 7,9 \text{ KW}^{-1}$$

Zvolíme parametry potřebné pro výpočet chladiivosti povrchu

Výška stěny	$h = 0,05 \text{ m}$
Emisivita bakelitu	$E_{z2} = 0,8$
Činitel stínění	$N = 0,7$
Teplota okolí	$T_o = 40^\circ\text{C}$
Oteplení vodiče	$\theta_v = 50 \text{ K}$

Chladiivost bakelitové stěny panelu je

$$\alpha_0 = N \cdot \alpha_z + \alpha_k = 0,7 \cdot (5,6 + 0,034\theta_p) + 4,3 + 0,055\theta_p = 8,22 + 0,0788\theta_p$$

Pomocná veličina K

$$K = S_b \sum R_T = (45 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (227 + 7,9) = 0,476$$

Oteplení vzduchu mezi kontaktním můstkem a bakelitovou stěnou včetně

$$\theta_p = -\left(\frac{1 + AK}{2BK}\right) + \sqrt{\left(\frac{1 + AK}{2BK}\right)^2 + \frac{\theta_v}{BK}} = 9,5 \text{ K}$$

Vypočtená chladiivost

$$\alpha_0 = N \cdot \alpha_z + \alpha_k = 8,22 + 0,0788 \cdot 9,5 = 8,97 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

Přepočet efektivní vodivosti vzduchu

$$Q = \alpha_0 \cdot S_b \cdot \theta_p = 8,97 \cdot (45 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 9,5 = 0,173 \text{ W}$$

$$T_2 = T_o + \theta_p + Q \cdot R_{Tb} = 40 + 9,5 + 0,173 \cdot 7,9 = 50,9^\circ\text{C} \rightarrow 323,9 \text{ K}$$

$$T_1 = T_2 + Q \cdot R_{Tv} = 50,9 + 0,173 \cdot 227 = 90,2^\circ\text{C} \rightarrow 363,2 \text{ K}$$

$$T_s = 0,5(T_1 + T_2) = 0,5(50,9 + 90,2) = 70,5^\circ\text{C}$$

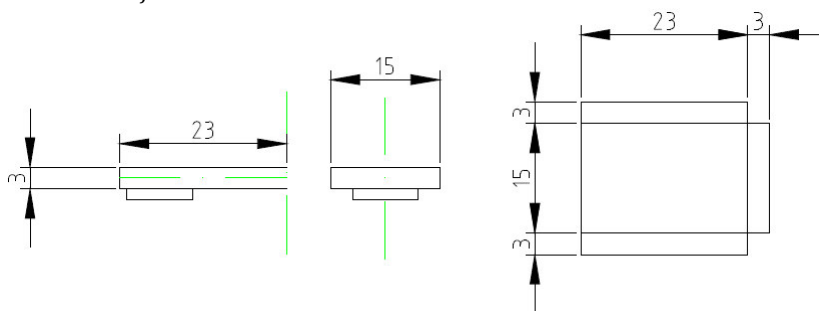
Ze střední teploty T_S zvolíme hodnotu $C_V = 0,449$

$$\begin{aligned}\alpha_z &= 5,7 \cdot 10^{-8} E_{z12} \cdot (T_1^2 + T_2^2) \cdot (T_1 + T_2) \\ &= 5,7 \cdot 10^{-8} 0,735 \cdot (363,2^2 + 323,9^2) \cdot (363,2 + 323,9) \\ &= 6,82 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda_{ev} &= C_V \cdot \delta^{0,75} (T_1 - T_2)^{0,25} + \alpha_z \frac{l_1 \delta}{\delta + l_1} \\ &= 0,449 \cdot 43 \cdot 10^{-3}^{0,75} \cdot (90,2 - 50,9)^{0,25} + 6,82 \frac{31 \cdot 10^{-3} \cdot 45 \cdot 10^{-3}}{(43 + 31) \cdot 10^{-3}} \\ &= 0,229 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-2}\end{aligned}$$

Chyba předběžného výpočtu nesmí přesáhnout 5 %.

$$|\Delta\%| = 100 \cdot \frac{\lambda_{efv} - \lambda'_{efv}}{\lambda_{efv}} = 100 \cdot \frac{0,229 - 0,223}{0,229} = 2,6 \%$$



Obrázek 8.14 Znáznornění chladicího povrchu kontaktního můstku

Chladicí povrch můstku

$$P_v = O_v \cdot l_v = (3 + 3 + 15) \cdot 23 + 15 \cdot 3 = 0,53 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Náhradní součinitel přestupu tepla

$$\begin{aligned}\alpha_{on} &= \frac{1}{P_v \left(\sum R_T + \frac{1}{\alpha_o \cdot S_b} \right)} = \frac{1}{0,53 \cdot 10^{-3} \left((362,3 + 14,7) + \frac{1}{8,97 \cdot (45 \cdot 10^{-3})} \right)} \\ &= 6,53 \text{ W m}^2 \text{ K}^{-1}\end{aligned}$$

$$\beta l = l_v \sqrt{\frac{\alpha_{on} \cdot O_v}{\lambda_{cu} \cdot S_1}} = 23 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{6,53 \cdot 21 \cdot 10^{-3}}{385 \cdot 45 \cdot 10^{-3}}} = 0,065$$

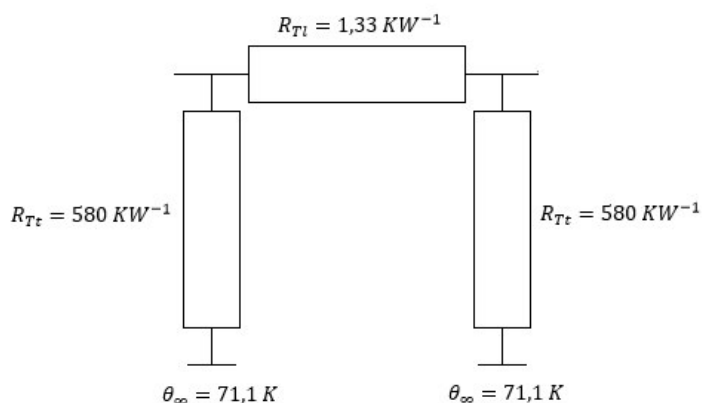
Jelikož je $\beta l < 0,1$ jedná se o tepelně krátkou tyč

$$R_{Tl} = \frac{l_v}{\lambda_{cu} \cdot S_v} = \frac{23 \cdot 10^{-3}}{385 \cdot 45 \cdot 10^{-6}} = 1,33 \text{ KW}^{-1}$$

$$R_{Tt} = \frac{2}{\alpha_{on} \cdot P_v} = \frac{2}{6,53 \cdot 0,53 \cdot 10^{-3}} = 580 \text{ KW}^{-1}$$

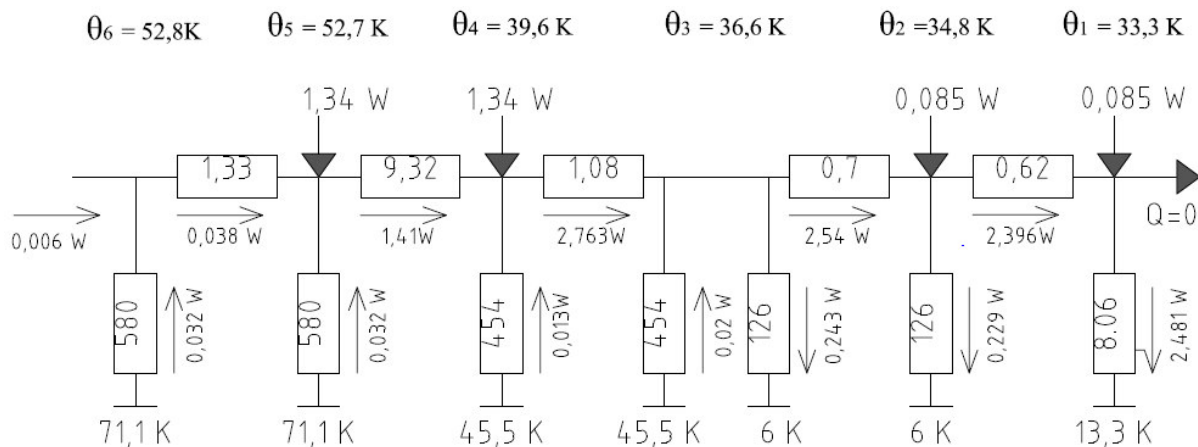
$$\theta_{\infty} = \frac{R_1 \cdot I^2}{\alpha_{on} \cdot P_v} = \frac{11 \cdot 10^{-6} \cdot 160^2}{6,53 \cdot 0,53 \cdot 10^{-3}} = 71,1 \text{ K}$$

Náhradní schéma kontaktního můstku



Obrázek 8.15 Náhradní schéma π článku kontaktního můstku

Sestavení a výpočet náhradního schématu



Obrázek 8.16 Celkové náhradní tepelné schéma

Na obrázku 8.16 můžeme vidět sestavené celkové nahraní schéma pro zvolené oteplení 33,3 K. Toto oteplení jsme stanovili dvěma předcházejícími výpočty, u kterých nebyla splněna podmínka nulového vytékajícího proudu. Jelikož při prvním zvoleném oteplení $\theta_{a1} = 44 \text{ K}$ nám vyšel výstupní proud $Q_{an} = 1,687 \text{ W}$ a pro druhé zvolené oteplení $\theta_{b1} = 30 \text{ K}$ nám vyšla hodnota proudu $Q_{bn} = -0,512 \text{ W}$. Ze zvolených oteplení je patrné, že hledané oteplení θ_{c1} se bude nacházet někde mezi θ_{a1} a θ_{b1} . Hledané oteplení vypočteme následovně

$$\theta_{c1} = \theta_{a1} - \frac{Q_{an}(\theta_{b1} - \theta_{a1})}{Q_{bn} - Q_{an}} = 44 - \frac{1,687(30 - 44)}{-0,512 - 1,687} = 33,3 \text{ K}$$

Princip výpočtu bude příkladně naznačen pro oteplení $\theta_{c1} = 33,3 \text{ K}$

Výpočet poměrů v uzlu 1

$$Q_1 = \frac{\theta_1 - \theta_{\infty 1}}{R_{Tt}} = \frac{33,3 - 13,3}{8,06} = 2,481 \text{ W}$$

$$\sum Q_{u1} = -0,085 + 2,481 = 2,396 \text{ W}$$

$$\Delta\theta_{12} = R_{Tl} \cdot Q_{u1} = 0,62 \cdot 2,396 \doteq 1,5 \text{ K}$$

Výpočet poměrů v uzlu 2

$$\theta_2 = \theta_1 + \Delta\theta_{12} = 33,3 + 1,5 = 34,8 \text{ K}$$

$$Q_2 = \frac{\theta_2 - \theta_{\infty 2}}{R_{Tt}} = \frac{34,8 - 6}{126} = 0,229 \text{ W}$$

$$\sum Q_{u2} = -0,085 + 2,396 = 2,54 \text{ W}$$

$$\Delta\theta_{23} = R_{Tl} \cdot Q_{u2} = 0,7 \cdot 2,54 \doteq 1,8 \text{ K}$$

Výpočet poměrů v uzlu 3

$$\theta_3 = \theta_2 + \Delta\theta_{23} = 34,8 + 1,8 = 36,6 \text{ K}$$

$$Q_{3a} = \frac{\theta_3 - \theta_{\infty 3a}}{R_{Tt}} = \frac{36,6 - 6}{126} = 0,243 \text{ W}$$

$$Q_{3b} = \frac{\theta_3 - \theta_{\infty 3b}}{R_{Tt}} = \frac{36,6 - 45,5}{454} = -0,02 \text{ W}$$

$$\sum Q_{u3} = -0,02 + 0,243 + 2,54 = 2,763 \text{ W}$$

$$\Delta\theta_{34} = R_{Tl} \cdot Q_{u3} = 1,08 \cdot 2,763 \doteq 3 \text{ K}$$

Výpočet poměrů v uzlu 4

$$\theta_4 = \theta_3 + \Delta\theta_{34} = 36,6 + 3 = 39,6 \text{ K}$$

$$Q_4 = \frac{\theta_4 - \theta_{\infty 4}}{R_{Tt}} = \frac{39,6 - 45,5}{454} = -0,013 \text{ W}$$

$$\sum Q_{u4} = -1,34 - 0,013 + 2,763 = 1,41 \text{ W}$$

$$\Delta\theta_{45} = R_{Tl} \cdot Q_{u4} = 9,32 \cdot 1,41 \doteq 13,1 \text{ K}$$

Výpočet poměrů v uzlu 5

$$\theta_5 = \theta_4 + \Delta\theta_{45} = 39,6 + 13,1 = 52,7 \text{ K}$$

$$Q_5 = \frac{\theta_5 - \theta_{\infty 5}}{R_{Tt}} = \frac{52,7 - 71,1}{580} = -0,032 \text{ W}$$

$$\sum Q_{u5} = -1,34 - 0,032 + 1,41 = 0,038 \text{ W}$$

$$\Delta\theta_{56} = R_{Tl} \cdot Q_{u5} = 1,33 \cdot 0,038 \doteq 0,1 \text{ K}$$

Výpočet poměrů v uzlu 6

$$\theta_6 = \theta_5 + \Delta\theta_{56} = 52,7 + 0,1 = 52,8 \text{ K}$$

$$Q_2 = \frac{\theta_2 - \theta_{\infty 2}}{R_{Tt}} = \frac{52,8 - 71,1}{580} = -0,032 \text{ W}$$

$$\sum Q_{u6} = -0,032 + 0,038 = 0,006 \text{ W}$$

Provedeme kontrolu předpokládaného oteplení se skutečným oteplením. Vypočtené oteplení by se nemělo lišit o více než 5 % odhadovaného oteplení

$$\Delta T = 0,05(T_o + \theta) = 0,05(40 + 50) = 4,5 \text{ K}$$

Jak můžeme vidět, tak oteplení svorky je mimo dovolenou toleranci 5 % budeme muset provést přepočítání odporu R_{Ts} pro střední oteplení svorky.

$$R'_{Ts} = \frac{c R_s}{\lambda_{cu} \cdot \rho_{cu}} = \frac{0,8 \cdot 6,8 \cdot 10^{-6}}{385 \cdot \left(19,2 \cdot 10^{-9} \left(1 + 0,0036(0,5(33,3 + 34,8))\right)\right)} = 0,66 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$$

Rovněž se liší i oteplení přívodního pásku umístěného vně a uvnitř stykače. Budeme muset provést přepočty oteplení konců příčných větví π – článku.

Odpor pásku R'_b vně stykače pro vypočtené oteplení

$$R'_b = \rho_{cu} \cdot \frac{l_b}{S_2} = 19,2 \cdot 10^{-9} (1 + 0,0036 \cdot 0,5 \cdot (34,8 + 36,6)) \cdot \frac{13 \cdot 10^{-3}}{84 \cdot 10^{-6}} \\ = 3,35 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Měrná chladivost zářením pro střední oteplení

$$\alpha'_z = 2,8 + 0,017 \cdot \theta_p = 2,8 + 0,017 \cdot 0,5 \cdot (34,8 + 36,6) = 3,41 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Celková měrná chladivost

$$\alpha'_o = N \cdot \alpha_z + \alpha_k = 0,7 \cdot 3,41 + 5,6 + 0,081 \cdot 0,5 \cdot (34,8 + 36,6) \\ = 10,88 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Přepočty oteplení θ_∞ konců příčných větví π – článku

$$\theta_\infty = \frac{R'_b \cdot I^2}{\alpha'_o \cdot P_v} = \frac{3,35 \cdot 10^{-6} \cdot 160^2}{10,88 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3}} = 6,06 \doteq 6,1 \text{ K}$$

Jak můžeme pozorovat po přepočtení oteplení θ_∞ konců příčných větví π – článku oteplení se změnilo jen nepatrně, a to jen o jednu desetinu což má nepatrný vliv na výsledné hodnoty oteplení.

Nyní provedeme přepočty změny oteplení konců příčných větví π – článku, které jsou umístěny uvnitř stykače.

Změna odporu R'_a umístěného uvnitř stykače

$$R'_a = \frac{\rho_{cu}}{S_2} [l_a - b + b \cdot (K_B + K_C + K_D - 3)] \\ = \frac{19,2 \cdot 10^{-9} (1 + 0,0036 \cdot 0,5 \cdot (39,6 + 36,6))}{84 \cdot 10^{-6}} [40,7 \cdot 10^{-3} - 21 \cdot 10^{-3} \\ + 21 \cdot 10^{-3} \cdot (1,02 + 1,38 + 1,05 - 3)] = 7,58 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Celková měrná chladivost

$$\alpha'_o = N \cdot \alpha_z + \alpha_k = 1 \cdot (5,6 + 0,034 \cdot 38,1) + (3 + 0,03 \cdot 38,1) = 11,04 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

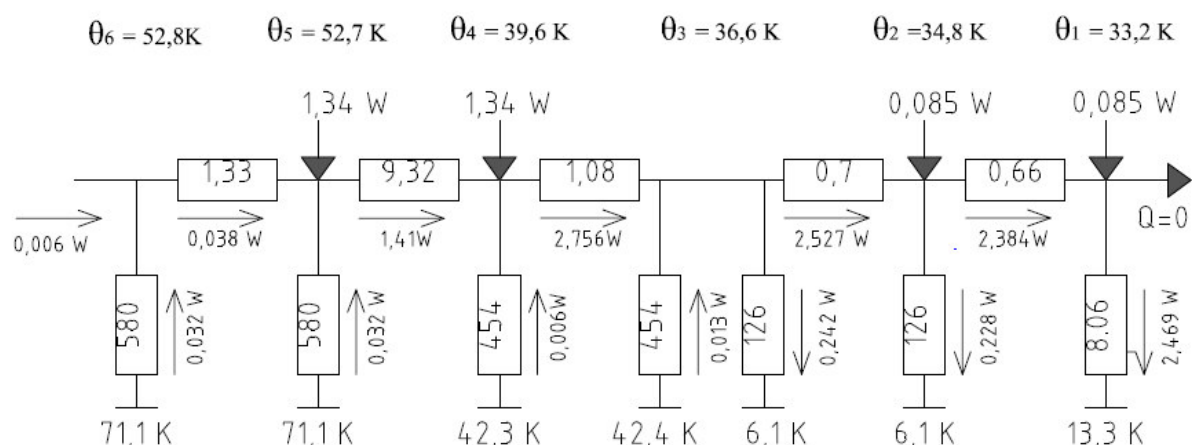
Výpočet náhradní chladivosti povrchu α_{on}

$$\alpha_{on} = \frac{1}{P_v \left(\sum R_T + \frac{1}{\alpha_o \cdot O \cdot l} \right)} = \frac{1}{1,02 \cdot 10^{-3} \left(124 + \frac{1}{11,04 \cdot 0,96 \cdot 10^{-3}} \right)} \\ = 4,49 \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

Přepočty oteplení θ_∞ konců příčných větví π – článku

$$\theta_\infty = \frac{R'_a \cdot I^2}{\alpha_{on} \cdot P_v} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6} \cdot 160^2}{4,49 \cdot 1,02 \cdot 10^{-3}} = 42,37 \text{ K}$$

Porovnáním jednotlivých přepočtených hodnot náhradního schématu můžeme říct, že jednotlivé změny jsou velmi malé až nepatrné, pro představu vložíme opravené přepočtené schéma.



Obrázek 8.17 Přepočtené náhradní tepelné schéma

Jak je zřejmé z obrázku 8.17 největšího oteplení dosahujeme ve středu proudovodné dráhy. Dle literatury [6, str.69 tabulka 2–50] zjišťujeme, že vypočtené oteplení v jednotlivých částech proudovodné dráhy je pod hodnotami dovoleného oteplení, takže návrh proudovodné dráhy z pohledu oteplení vyhovuje.

8.1.7 Krátkodobé oteplení

Nejmenší průřez proudovodné dráhy má kontaktní můstek, jehož průřez je

$$S_k = 15 \cdot 3 = 45 \text{ mm}^2 = 45 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

Oteplení pásu v ustáleném stavu zvolíme z obrázku 8.16 $\theta_n = 52,8 \text{ K}$. Kde skutečná teplota kontaktního můstku je

$$T_n = T_{om} + \theta_n = 40 + 52,8 = 92,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Dovolené krátkodobé oteplení uvažovaného vodiče, které není v úzkém kontaktu s izolanty, ale je obklopen vzduchem. Proto maximální dovolená teplota vodiče z mědi může být $T_k = 300 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Krajní dovolené oteplení je

$$\theta_k = T_k - T_{om} - \theta_n = 300 - 40 - 52,8 = 207,2 \text{ K}$$

Výpočet odporu mědi pro teplotu $92,8 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\rho_n = \rho_{40}(1 + \alpha\theta_n) = 19,2 \cdot 10^{-9}(1 + 0,0036 \cdot 52,8) = 22,85 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$$

Výpočet teplotního součinitele

$$\alpha_n = \frac{\rho_{40}}{\rho_n} \cdot \alpha = \frac{19,2 \cdot 10^{-9}}{22,9 \cdot 10^{-9}} \cdot 0,0036 = 0,00303 \text{ K}^{-1}$$

Zavedeme pomocnou veličinu k pro jednovteřinový proud t_k

$$k = \frac{\theta_k}{t_k + \alpha_n t_k \theta_k} = \frac{207,2}{1 + 0,00302 \cdot 1 \cdot 207,2} \doteq 127$$

Krajní jednovteřinový proud

$$I_{k1} = S_k \sqrt{\frac{k \cdot c}{\rho_n}} = 45 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{127 \cdot 3,4 \cdot 10^6}{22,85 \cdot 10^{-9}}} = 6\,186\text{ A}$$

Vypočetli jsme krajní hodnotu proudu, který snese vodič s nejmenším průřezem na proudovodné dráze. Nyní budeme muset stanovit hodnotu proudu, kterou snesou kontakty, aniž by došlo k jejich svaření.

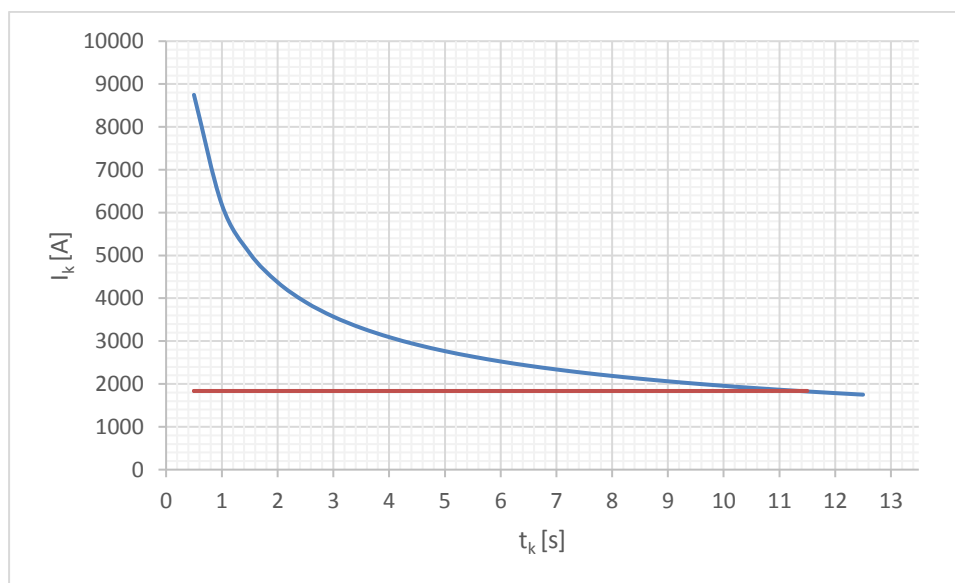
Podle vypočteného kontaktního tlaku $F_{kn} = 18,5\text{ N}$ a jeho odlehčovací elektrodynamické síle $F_{dn} = 5,54\text{ N}$ stanovíme proud svaření stříbrných kontaktů

$$A = \left(\frac{U_{sv}}{1,5 \cdot k} \right)^2 = \left(\frac{0,37}{1,5 \cdot 4,5 \cdot 10^{-4}} \right)^2 = 3,01 \cdot 10^5$$
$$B = \frac{F_{dn}}{I_k^2} = \frac{5,54}{1600^2} = 2,16 \cdot 10^{-6}$$

$$I_{sv} = \sqrt{\frac{A \cdot F_{kn}}{1 + AB}} = \sqrt{\frac{3,01 \cdot 10^5 \cdot 18,5}{1 + 3,01 \cdot 10^5 \cdot 2,16 \cdot 10^{-6}}} \doteq 1836\text{ A}$$

Vypočtené údaje vyneseme do grafu 8.2 a sestavíme charakteristiku krátkodobého zatížení proudovodné dráhy.

Graf 8.2 Vynesení dovoleného proudového zatížení proudovodné dráhy



Na grafu 8.2 můžeme pozorovat, že efektivní hodnota krátkodobého proudu nesmí přesáhnout 1800 A, jinak by došlo ke svaření kontaktů. Navržený stykač splňuje podmínky pro užití v kategorii AC3, kde musí stykač bezpečně sepnout až desetinásobek jmenovitého proudu.

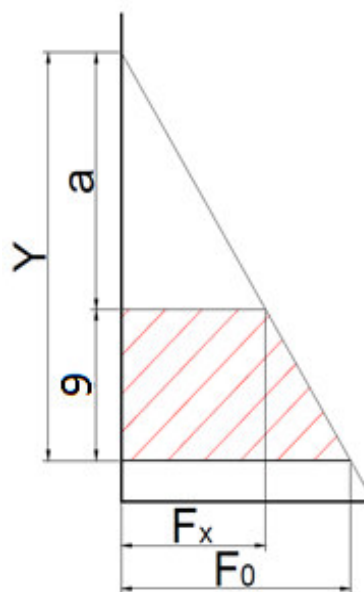
8.2 Vypínací pružiny

S ohledem na vypínací oblouk zvolíme vypínací zdvih kontaktů na 9 mm. Jelikož pracovní zdvih kontaktu je zvolen 5 mm. Musíme stanovit celkový zdvih vypínacího systému, který je roven

$$z = 9 + 5 = 14 \text{ mm}$$

Předběžně stanovíme potřebnou sílu vypínací pružiny pro vypínací systém, který je tvořen z kotvy elektromagnetu a kontaktů, včetně nosné konstrukce kontaktů. Předběžně stanovíme potřebnou sílu na 7 N. Vzhledem ke zvýšení bezpečnosti zvýšíme potřebnou sílu o 1,5násobek oproti zvolené hodnotě

$$F_x = 1,5 \cdot 7 = 10,5 \text{ N}$$



Obrázek 8.18 Diagram vypínací pružiny

Vypínací pružina by měla mít měkkou charakteristiku, proto zvýšíme sílu pružiny ve stlačeném stavu o 25 %

$$F_0 = F_x \cdot 1,25 = 10,5 \cdot 1,25 = 13,13 \div 13 \text{ N}$$

Pracovní zdvih pružiny je zvolen 14 mm

$$\frac{l + 14}{l} = \frac{F_0}{F_x} \rightarrow a = \frac{14 \cdot F_x}{F_0 - F_x} = \frac{14 \cdot 10,5}{13 - 10,5} \div 59 \text{ mm}$$

Zatížení pružiny při plném stlačení

$$Y = a + 14 = 59 + 14 = 73 \text{ mm}$$

Zvolíme poměr A mezi středním průměrem drátu pružiny d a průměrem pružiny D_s . Jelikož v tomto případě nebude lehké předem určit pružinu s vhodnými parametry, budeme muset zvolit více poměrů A

$$A_1 = \frac{D_s}{d} = 10 \quad A_2 = \frac{D_s}{d} = 12 \quad A_3 = \frac{D_s}{d} = 14 \quad A_4 = \frac{D_s}{d} = 16 \quad A_5 = \frac{D_s}{d} = 18$$

Pro zvolené poměry A vypočítáme korekční činitel φ

$$\varphi_1 = \frac{A - 0,25}{A - 1} + \frac{0,625}{A} = \frac{10 - 0,25}{10 - 1} + \frac{0,625}{10} \div 1,15$$

$$\varphi_1 = 1,15 \quad \varphi_2 = 1,12 \quad \varphi_3 = 1,10 \quad \varphi_4 = 1,09 \quad \varphi_5 = 1,08$$

U návrhu vypínacích pružin stykače je velice důležité, aby navrhnutá pružina vydržela za svoji životnost až 10^6 zdvihů. Předběžně navrhujeme průměr drátu pružiny 0,5 mm z literatury [6, str.69 tabulka 3–1]. Tomuto průměru odpovídá namáhání v tahu $\sigma_{pt} = 2650 \text{ MPa}$. Činitel bezpečnosti zvolíme pro 10 zdvihů za minutu a pro teplotu 100 °C, kde $\mu = 3$ [6, str.70 tabulka 3–2].

Stanovíme dovolené namáhání ve smyku τ_D

$$\tau_D = \frac{6_{pt}}{1,6 \cdot \mu} = \frac{2650}{1,6 \cdot 3} = 552,08 \doteq 550 \text{ MPa}$$

Stanovíme průměr drátu pružiny. Jelikož vypínací pochod mechanismu budou zajišťovat dvě pružiny budeme uvažovat, že $F'_0 = F_0 \cdot 0,5 = 13 \cdot 0,5 = 6,5 \text{ N}$

$$d_1 = \sqrt{\frac{8 \cdot F'_0 \cdot A \cdot \varphi}{\tau_D \cdot \pi}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 6,5 \cdot 10 \cdot 1,15}{550 \cdot \pi}} = 0,588 \text{ mm}$$

$$d_1 = 0,588 \text{ mm} \quad d_2 = 0,636 \text{ mm} \quad d_3 = 0,681 \text{ mm} \quad d_4 = 0,724 \text{ mm} \quad d_5 = 0,765 \text{ mm}$$

Dle tabulky v uvedené literatuře [6, str.69 tabulka 3–I] jsme zvolili nejbližší průměry d_2 a d_4 .

$$d_2 = 0,63 \text{ mm}; \varphi_2 = 1,12; A_2 = \frac{D_s}{d} = 12 \quad d_4 = 0,71 \text{ mm}; \varphi_2 = 1,09; A_4 = \frac{D_s}{d} = 16$$

Výpočet počtu činných závitů (modul pružnosti pro tažný patentovaný drát z nelegované oceli $G = 80,5 \cdot 10^3 \text{ MPa}$)

$$n'_x = \frac{Y \cdot G \cdot d}{8 A^3 F_0} = \frac{69 \cdot 10^{-3} \cdot 80,5 \cdot 10^9 \cdot d}{8 \cdot A^3 \cdot 6,5}$$

$$n'_2 = 38,7 \doteq 39 \text{ závitů}$$

$$n'_4 = 18,5 \doteq 19 \text{ závitů}$$

Volíme pružinu n'_4 s 19 závity, kde následně provedeme přepočet. Musíme přidat dva závity n_z . Takže celkový počet závitu bude $z = 21$. Průměr drátu pružiny bude $d' = 0,71 \text{ mm}$.

Střední průměr pružiny bude

$$D_s = A \cdot d = 16 \cdot 0,71 = 11,36 \text{ mm}$$

Délka pružiny při stlačeném stavu

$$L_g = (1,08 + 1,15)^2 z \cdot d' = 1,08^2 \cdot 21 \cdot 0,71 \doteq 18,4 \text{ mm}$$

Délka pružiny ve volném stavu L_0

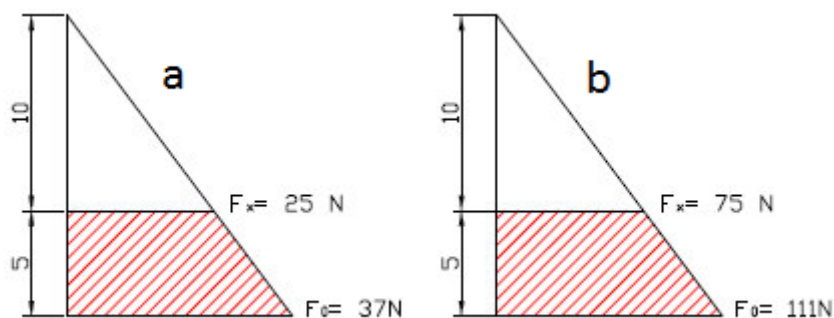
$$L_0 = L_g + Y = 18,4 + 69 \doteq 88 \text{ mm}$$

Stoupání závitů pružiny

$$s = \frac{L_0 - n_z \cdot d'}{n'_4} = \frac{88 - 2 \cdot 0,75}{19} = 4,56 \text{ mm}$$

8.3 Sestavení průběhu neaktivních odporů

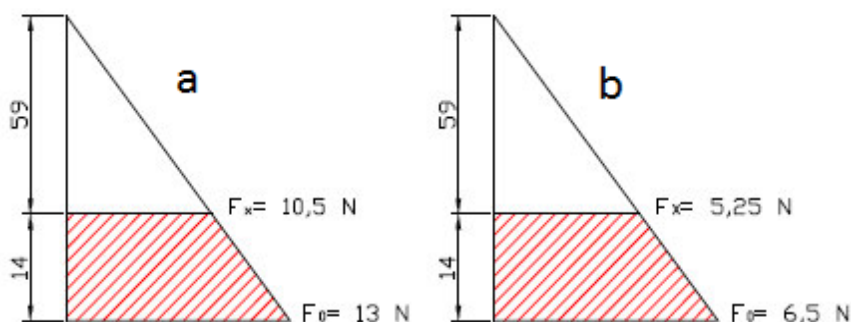
Při sepnutí elektromagnetu se uvedou v pohyb neaktivní odpory, které jsou uvedeny v pohyb díky působení kotvy elektromagnetu. Nyní je nutné sestavit diagramy kontaktních a vypínacích pružin.



Obrázek 8.19 Diagramy kontaktních pružin

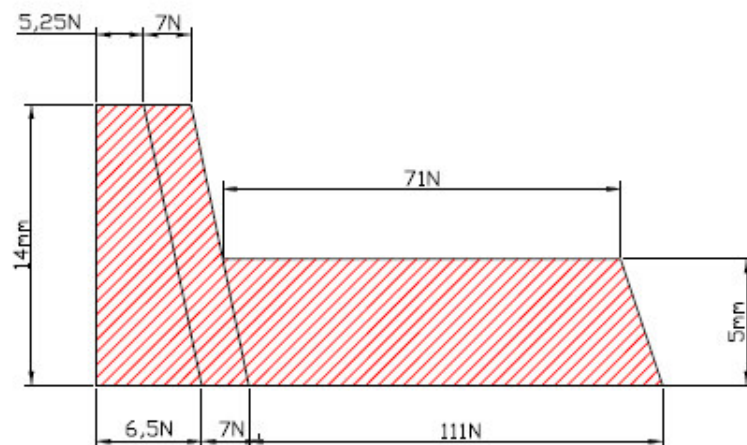
Na obrázku 8.19a je vyobrazen diagram jedné kontaktní pružiny, jelikož elektromagnet při sepnutí kotvy spíná všechny tři kontaktní pružiny ve stejném okamžiku musíme sestavit diagram všech tří kontaktních pružin vyobrazených na obrázku 8.19b.

Rovněž stejně budeme tyto diagramy muset sestavit i pro dvě vypínací pružiny. Sestavené diagramy jsou uvedeny na obrázku 8.20.



Obrázek 8.20 Sestavené pracovní diagramy vypínacích pružin

V neposlední řadě budeme muset sestavit celkový pracovní diagram pro vypínací a kontaktní pružiny. Při sestavování celkového pracovního diagramu nesmíme zapomenout uvažovat s třením nosné konstrukce vypínacích pružin. Musíme uvažovat, že elektromagnet zvedá celé pohyblivé spínací ústrojí o hmotnosti 0,7 kg. Této hmotnosti odpovídá odpudivá síla cca 7 N. Tuto sílu nesmíme zapomenou přidat do diagramu.



Obrázek 8.21 Celkový pracovní diagram pružin

9 Návrh elektromagnetu

9.1 Určení potřebného tahu elektromagnetu

Maximální zdvih elektromagnetu	$\delta = 14 \text{ mm}$
Celková velikost vzduchové mezery	$\Sigma \delta = 28 \text{ mm}$
Odhadnutý průřez jádra	$S_j = 5,29 \text{ cm}^2$
Indukce transformátorových plechů	$B_{tp} = 1,3 \text{ T}$
Počet sepnutí za hodinu	600
Zatěžovatel	60%

Stanovíme si potřebnou minimální přitažnou sílu F_p

$$F_p = 2,5 \cdot F = 2,5 \cdot (5,25 + 7) \doteq 30,7 \text{ N}$$

Ze zvolených základních parametrů magnetického obvodu vypočteme přítlačnou sílu na počátku zdvihu

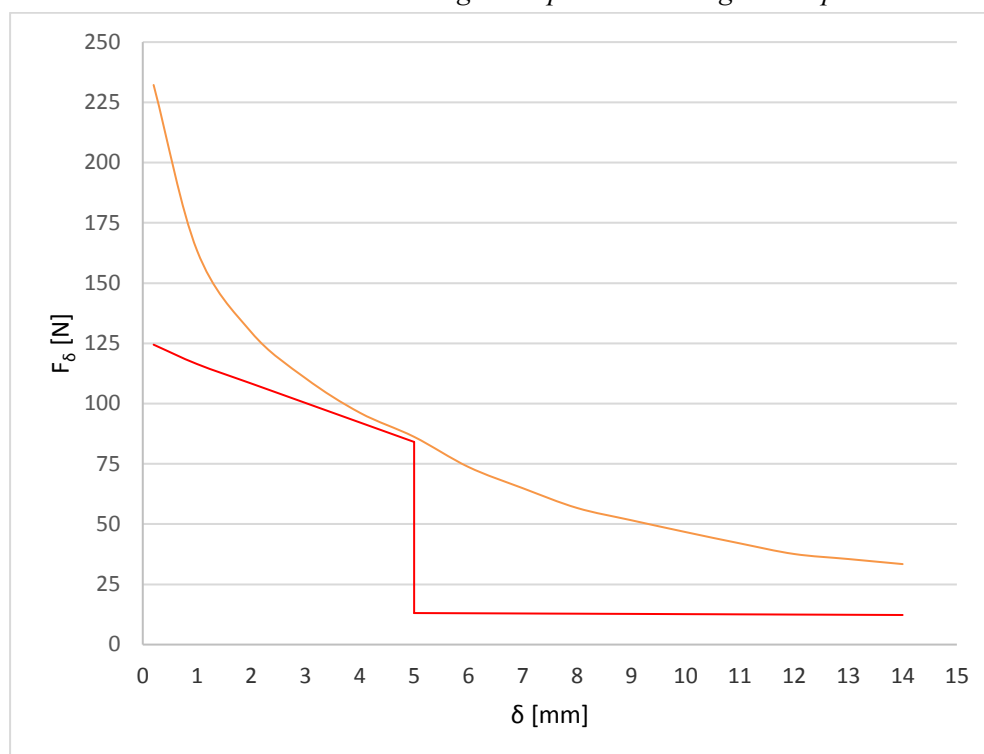
$$F_\delta = 5,8 \cdot 10^5 \cdot K_F^2 \cdot S = 5,8 \cdot 10^5 \cdot 0,33^2 \cdot 529 \cdot 10^{-6} \doteq 33,4 \text{ N}$$

Vidíme, že pro zvolený průřez jádra je záťah elektromagnetu dostatečný. Nyní v tabulce 9.1 vypočteme další potřebné hodnoty pro výpočet statické charakteristiky elektromagnetu. Hodnota K_F je odečtena z grafu [6, str.88, graf 3-25 křivka C]

Tabulka č. 9.1 Vypočtené parametry statické charakteristiky elektromagnetu

Úsek č.	δ [mm]	$\Sigma \delta$ [cm]	$S_j / \Sigma \delta$ [cm ² /cm]	K_F	K_F^2	F_δ [N]
1	14	2,8	1,89	0,33	0,1089	33,4
2	13	2,6	2,03	0,34	0,1156	35,5
3	12	2,4	2,2	0,35	0,1225	38,0
4	11	2,2	2,4	0,37	0,1369	42,0
5	10	2,0	2,65	0,39	0,1521	46,7
6	9	1,8	2,94	0,41	0,1681	51,6
7	8	1,6	3,31	0,43	0,1849	56,7
8	7	1,4	3,78	0,46	0,2116	64,9
9	6	1,2	4,41	0,49	0,2401	73,7
10	5	1,0	5,29	0,53	0,2809	86,2
11	4	0,8	6,61	0,56	0,3136	96,2
12	3	0,6	8,82	0,60	0,3600	110,5
13	2	0,4	13,23	0,65	0,4225	129,6
14	1	0,2	26,45	0,73	0,5329	163,5
15	0,2	0,04	132,25	0,87	0,7569	232,2

Graf 9.1 Statická charakteristika elektromagnetu s pracovním diagramem pružin



Z grafu 9.1 je patrné, že pracovní diagram pružin je po celé zdvihové délce kotvy umístěn pod statickou charakteristikou elektromagnetu. Při napínání kontaktních pružin je rozdíl sil minimální, což vede k dobře zvolnému kontaktnímu tlaku.

9.2 Návrh železného jádra a vinutí cívky

Průřez jádra

$$S_j = 5,29 \text{ cm}^2$$

Ztrátový činitel

$$p_{tp} = 2,6 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Činitel plnění

$$K_{Fe} = 0,9$$

Frekvence

$$f = 50 \text{ Hz}$$

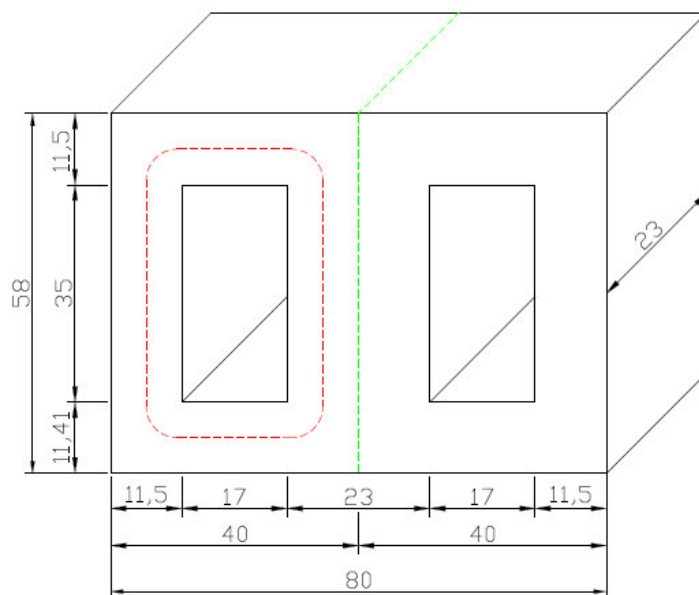
Zvolené napětí cívky

$$U_c = 230 \text{ V}$$

Potřebný počet závitů cívky

$$N = \frac{0,85 U_c}{4,44 f \cdot B_{tp} \cdot S_j \cdot K_{Fe}} = \frac{0,85 \cdot 220}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,3 \cdot 529 \cdot 10^{-6} \cdot 0,9} \doteq 1361 \text{ závitů}$$

Nyní musíme navrhnout k rozměru jádra, které činí $23 \times 23 \text{ mm}$ ostatní rozměry plechů. Návrh je proveden na obrázku 9.1.



Obrázek 9.1 Navržené rozměry plechu elektromagnetu

Délka střední siločáry

$$l_{fe} = 2 \cdot (3,5 + 1,7) + 2\pi \cdot 0,5 = 13,54 \text{ cm}$$

Nyní vyřešíme indukčnost elektromagnetu při přitažené kotvě. Z tabulky 9.1 víme, že při dotažené kotvě je velikost vzduchové mezery $\delta = 0,2 \text{ mm}$, tomu odpovídá poměr $\frac{S_j}{\sum \delta} = 132,25$, kde činitel vlivu rozptylové reaktance je zvolen $K_L = 1,1$. Relativní permeabilita transformátorových plechů se pohybuje od 2000 až do 5000, kde relativní permeabilitu transformátorových volíme $\mu_r = 2500$.

Indukčnost při dotažené kotvě

$$L_2 = \frac{K_L N^2 S_j \mu_r \mu_0}{\mu_r \sum \delta + l_{fe}} = \frac{1,1 \cdot 1361^2 \cdot 529 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 2500 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^{-6}}{2500 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} + 0,1354} = 5,33 \text{ H}$$

Předběžný klidový proud, při dovoleném nejvyšším napětí

$$I_2 = \frac{1,1 \cdot U_c}{\omega L_2} = \frac{1,1 \cdot 230}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5,33} = 0,151 \text{ A}$$

Průřez drátu při proudové hustotě $\sigma_d = 3,5 \text{ A/mm}^2$

$$S_d = \frac{I_2}{\sigma_d} = \frac{0,151}{3,5} = 0,043 \text{ mm}^2$$

Zvolíme normalizovaný průřez drátu, kterému odpovídá průřez $S'_d = 0,0491 \text{ mm}^2$, jehož průměr je $d'_i = 0,250 \text{ mm}$. Přidáme-li izolaci $d_{iz} = 0,034 \text{ mm}$. Bude celkový průměr drátu $d_i \doteq 0,284 \text{ mm}$.

Stanovíme délku vrstvy závitů

$$l_v = 35 - (1,5 + 1,5) = 32 \text{ mm}$$

Stanovíme počet závitů jedné vrstvy

$$N_1 = \frac{l_v}{1,13 \cdot d_i} = \frac{32}{1,13 \cdot 0,284} = 99,71 \doteq 100 \text{ závitů}$$

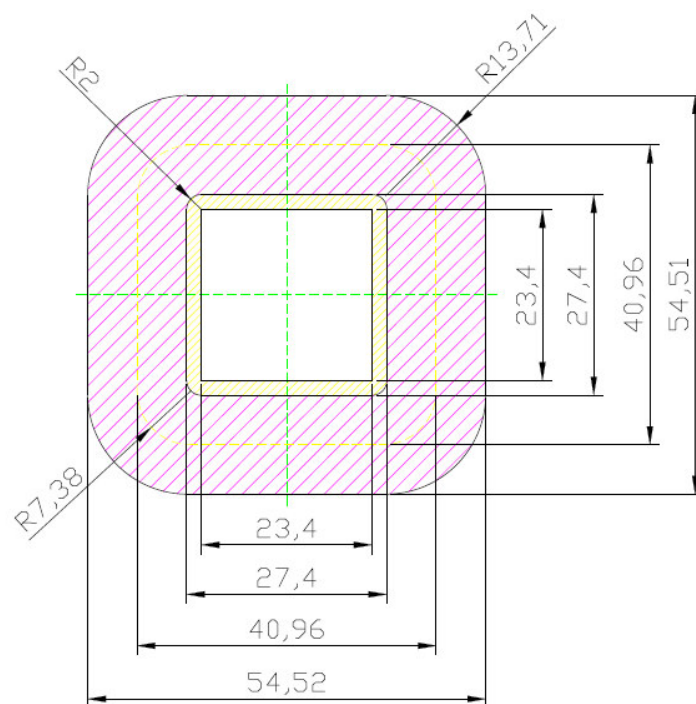
Stanovíme počet vrstev

$$n = \frac{N}{N_1} = \frac{1367}{100} = 13,67 \doteq 14 \text{ vrstev}$$

Stanovíme tloušťku vinutí

$$h_v = n \cdot (d_i + \text{mezizávitová izolace}) = 14 \cdot (0,284 + 0,2) = 6,78 \text{ mm} = 0,0068 \text{ m}$$

Na obrázku 9.2 je navržená cívka elektromagnetu z vypočtených parametrů.



Obrázek 9.2 Návrh cívky elektromagnetu

Střední délku závitu

$$l_z = 2 \cdot (27,4 + 27,4) + 2\pi \cdot 7,38 = 155,9 \text{ mm} \doteq 0,156 \text{ m}$$

Celková délka vinutí cívky

$$l_c = N \cdot l_z = 1367 \cdot 0,156 \doteq 213 \text{ m}$$

Ohmický odpor cívky vinutí při oteplení 60 K

$$\begin{aligned} R_c &= \rho \cdot \frac{l_c}{S_d} = \rho_{40} \cdot (1 + \alpha\theta) \cdot \frac{4l_c}{\pi \cdot d_i^2} \\ &= 19,2 \cdot 10^{-9} \cdot (1 + 0,0036 \cdot 60) \cdot \frac{4 \cdot 213}{\pi \cdot 0,00025^2} = 101,3 \doteq 101 \Omega \end{aligned}$$

Reaktance X_2 vinutí v sepnutém stavu

$$X_2 = \omega \cdot L_2 = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5,33 \doteq 1675 \, \Omega$$

Impedance Z_2 v sepnutém stavu

$$Z_2 = \sqrt{R^2 + X_2^2} = \sqrt{101^2 + 1675^2} \doteq 1678 \, \Omega$$

Velikost skutečného proudu

$$I_2 = \frac{1,1 \cdot U_c}{Z_2} = \frac{1,1 \cdot 230}{1678} \doteq 0,151 \, A$$

Nyní vyřešíme indukčnost elektromagnetu při odpadlé kotvě. Z tabulky 9.1 víme, že při dotažené kotvě je velikost vzduchové mezery $\delta = 14 \, mm$, tomu odpovídá poměr $\frac{S_j}{\Sigma \delta} = 1,86$, kde činitel vlivu rozptylové reaktance je zvolen $K_L = 1,1$. Relativní permeabilita transformátorových plechů se pohybuje od 2000 až do 5000, kde relativní permeabilitu transformátorových plechů volíme $\mu_r = 2500$.

Indukčnost při dotažené kotvě

$$L_2 = \frac{K_L N^2 S_j \mu_r \mu_0}{\mu_r \Sigma \delta + l_{fe}} = \frac{4,8 \cdot 1361^2 \cdot 529 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 2500 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^{-6}}{2500 \cdot 14 \cdot 10^{-3} + 0,1354} = 0,42 \, H$$

Reaktance X_1 vinutí při počátku zátahu kotvy

$$X_1 = \omega \cdot L_2 = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0,42 \doteq 132 \, \Omega$$

Impedance Z_2 v otepleném stavu vinutí při zátahu kotvy

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + X_2^2} = \sqrt{101^2 + 132^2} \doteq 166 \, \Omega$$

Proud při zátahu kotvy

$$I_1 = \frac{1,1 \cdot U_c}{Z_1} = \frac{1,1 \cdot 230}{166} = 1,52 \, A$$

9.2.1 Oteplení cívky elektromagnetu

Zvolený zatěžovatel stykače je 60 %, kde počet cyklů sepnutí za hodinu nebude smět překročit 600 sepnutí. Zapínací doba elektromagnetu v nejhorším případě nepřesáhne $t_z = 20,67 \, ms$.

Stanovíme dobu cyklu

$$T_s = \frac{3600}{600} = 6 \, s$$

Stanovíme čas Δt_2 z rovnice uvedeme v tabulce 9.2

$$\cos \omega \cdot \Delta t_2 + \frac{1}{\sqrt{2}} = e^{-\frac{R}{L} \Delta t_2}$$

Tabulka č. 9.2 Numerický výpočet času Δt_2

Δt_2 [s]	0,00643	0,00644	0,00645	0,00646	1,00646
$e^{-\frac{R}{L}\Delta t_2}$	0,263968	0,263421	0,262876	0,262332	2,87E-91
$\cos \omega \cdot \Delta t_2 + \frac{1}{\sqrt{2}}$	0,272819	0,269991	0,267168	0,264349	0,264349

Stanovíme čas t_1 , kde Δt_1 odpovídá času 2,5 ms

$$t_1 = t_z + 0,5(\Delta t_1 + \Delta t_2) = 20,67 + 0,5(2,5 + 0,0646) \doteq 21,95 \text{ ms} \doteq 0,021 \text{ s}$$

Stanovíme čas t_2

$$t_2 = (0,6 \cdot 6) - 0,021 = 3,58 \text{ s}$$

Oteplení cívky stanovíme z proudu pro trvalý chod I_2 . Vnější plášť cívky budeme považovat za chladicí povrch, vnitřní prostor mezi cívkou a železným jádrem je velmi malý, proto ho zanedbáme.

Uvažovaný povrch cívky

$$P_c = (23 + 23 + 2\pi \cdot 13,71) \cdot 32 = 4,23 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Měrná chladivost konvencí α_k , pro svislou stěnu 0,05 m

$$\alpha_k = 4,3 + 0,055\theta_p$$

Musíme podotknout, že chlazení konvencí je mírně ovlivňováno proudovodnou dráhou umístěnou pod cívkou elektromagnetu. Zhoršení oteplení konvencí od proudovodné dráhy můžeme zanedbat za předpokladu, budeme-li uvažovat, že zhoršené oteplení bude kompenzováno chladícím účinkem vnějšího čela cívky.

Měrná chladivost záření α_z , kde zvolíme $E_z \approx 0,9$ pro teplotu okolí $T_o = 40^\circ\text{C}$

$$\alpha_z = 6,3 + 0,038\theta_p$$

V okně jádra není povrch cívky pro odvod tepla sáláním a konvencí účinný. Proto uvažujeme pro činitele zmenšení plochy $\frac{P_z}{P_k} = 1$.

Stanovíme celkovou měrnou chladivost povrchu α_o . Činitele stínění okolních ploch odhadneme $N = 0,8$.

$$\begin{aligned} \alpha_o &= \alpha_k + N\alpha_z = 4,3 + 0,055\theta_p + 0,8 \cdot (6,3 + 0,038\theta_p) = 9,34 + 0,0854\theta_p \\ &= A + B \cdot \theta_p \end{aligned}$$

Stanovíme oteplení povrchu cívky θ_p

$$\begin{aligned} \theta_p &= -\frac{A}{2B} + \sqrt{\left(\frac{A}{2B}\right)^2 + \frac{R \cdot I^2}{P_c \cdot B}} \\ &= -\frac{9,34}{2 \cdot 0,0854} + \sqrt{\left(\frac{9,34}{2 \cdot 0,0854}\right)^2 + \frac{101 \cdot 0,151^2}{4,23 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0854}} \doteq 42 \text{ K} \end{aligned}$$

Jelikož, předpokládáme veškerý odvod tepla pláštěm cívky, dochází v nižších vrstvách k většímu oteplení než na povrchu pláště cívky.

Ekvivalentní tepelná vodivost

$$\lambda_e = \frac{\lambda_i(d + \delta)}{\delta} = \frac{0,25(0,25 + 0,234)}{0,234} \doteq 0,52 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-2}$$

R_{T1} vyjadřuje odpor rovinných stěn cívky

$$R_{T1} = \frac{1}{\lambda_e} \cdot \frac{h_v}{S} = \frac{1}{0,52} \cdot \frac{0,0068}{0,032 \cdot 0,0274 \cdot 2} = 7,46 \text{ KW}^{-1}$$

R_{T2} vyjadřuje odpor rohových stěn cívky

$$R_{T2} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi \cdot \lambda_e \cdot h} = \frac{\ln \frac{13,71}{2}}{2\pi \cdot 0,52 \cdot 0,032} = 18,41 \text{ KW}^{-1}$$

Jelikož uvažované tepelné odpory jsou řazeny paralelně, stanovíme celkový tepelný odpor radiálním směrem R_T

$$R_T = \frac{R_{T1} \cdot R_{T2}}{R_{T1} + R_{T2}} = \frac{7,46 \cdot 18,41}{7,46 + 18,41} = 5,31 \text{ KW}^{-1}$$

Stanovíme přírůstek oteplení vně cívky $\Delta\theta$

$$\Delta\theta = 0,53 \cdot R_T \cdot R \cdot I_1^2 = 0,53 \cdot 5,31 \cdot 101 \cdot 0,151^2 = 6,5 \text{ K}$$

Oteplení u první vrstvy vinutí je bráno od železného jádra

$$\theta_{vm} = \theta_p + \Delta\theta = 42 + 6,5 = 48,5 \text{ K}$$

Stanovíme střední oteplení vinutí cívky elektromagnetu

$$\theta_{vstř} = \frac{1}{2} \cdot (\theta_p + \theta_{vm}) = \frac{1}{2} \cdot (42 + 48,5) = 45,3 \text{ K}$$

9.2.2 Závít nakrátko

Stanovíme optimální velikost odporu závitu nakrátko pro průřez železného jádra. Průřez jádra $S_j = 529 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2$.

$$R_k = (2 \div 3) \cdot S = (2 \div 3) \cdot 529 \cdot 10^{-6} = (1,058 \div 1,587) \cdot 10^{-3} \Omega$$

Stanovíme hmotnost železného obvodu elektromagnetu

$$G = V \cdot \gamma \cdot K_{Fe} = ((0,08 \cdot 0,058) - (2 \cdot 0,017 \cdot 0,035)) \cdot 0,023 \cdot 7800 \cdot 0,93 = 0,576 \text{ Kg}$$

Stanovíme skutečné ztráty v železe

$$P_{skut} = \frac{1}{2} p_{fe} \cdot B_{tp}^2 \cdot G \cdot K_K = \frac{1}{2} \cdot 2,8 \cdot 1,3^2 \cdot 0,576 \cdot 2,5 = 3,4 \text{ W}$$

S okolním vzduchem se volně stýkají plochy železného obvodu elektromagnetu

$$A - 0,08 \cdot 0,0115 + 2 \cdot 0,035 \cdot 0,0115 = 1,725 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$B - 0,023 \cdot 2 \cdot 0,058 = 2,668 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$C - 0,08 \cdot 0,023 = 1,84 \cdot 10^{-3} m^2$$

Měrná chladiivost zářením při emisivitě $E_z = 0,8$, kde činitel vzájemného stínění ploch je $N = 0,9$

$$\alpha_z = 0,9 \cdot (5,6 + 0,034\theta_p) = 5,04 + 0,031\theta_p$$

Měrná chladiivost konvencí pro plochu A

$$\alpha_{kA} = 3,94 + 0,049\theta_p$$

Měrná chladiivost pro svislé stěny B a C

$$\alpha_{kBC} = 4,94 + 0,069\theta_p$$

Celková měrná chladiivost povrchu železa

$$\alpha_o = \alpha_z + \alpha_k = \alpha_z + \frac{\alpha_{kA}(A + 0,5A) + \alpha_{kBC}(B + C)}{A + 0,5A + B + C} = 9,62 + 0,093\theta_p$$

Povrch S_{Fe}

$$\begin{aligned} S_{Fe} &= A + 0,5A + B + C \\ &= 1,725 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 1,725 \cdot 10^{-3} + 2,668 \cdot 10^{-3} + 1,84 \cdot 10^{-3} \\ &= 7,1 \cdot 10^{-3} m^2 \end{aligned}$$

Maximální přípustné ztráty při dovoleném oteplení $\theta_p = 70 K$

$$P_{Fe} = \alpha_o \cdot S_{Fe} \cdot \theta_p = (9,62 + 0,093 \cdot 70) \cdot 7,1 \cdot 10^{-3} \cdot 70 = 8,02 W$$

Maximální tolerované ztráty

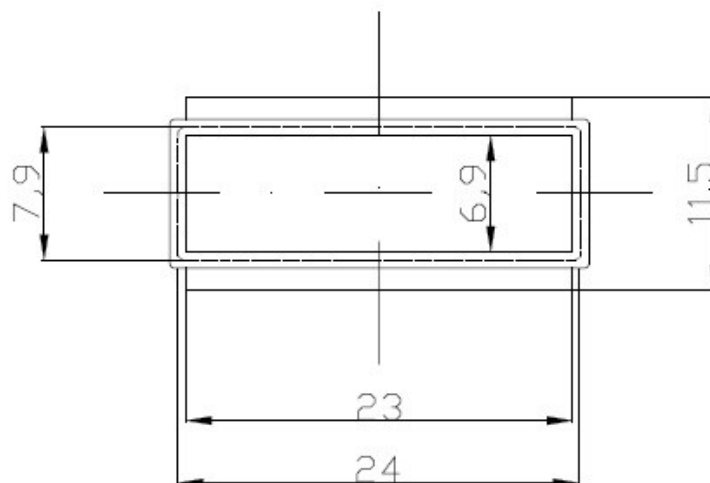
$$P_k = P_{Fe} - P_{skut} = 8,02 - 3,4 = 4,62 W$$

Napětí na jednom závitě pro plášťový typ, kde činitel $n = 0,3$

$$U_k = \frac{1,1U}{N} n = \frac{1,1 \cdot 230}{1361} \cdot 0,3 = 0,056 V$$

Minimální možný odpor při dvou závitech nakrátko na elektromagnetu

$$R_{kmin} = \frac{xU_k^2}{P_k} = \frac{2 \cdot 0,056^2}{4,62} = 1,35 \cdot 10^{-3} \Omega$$



Obrázek č. 9.3 Závit nakrátko při stínění pólu 60 %

9.3 Dynamika stykače

9.3.1 Zapínací doba a rychlost

Pro výpočet rychlosti a doby zapnutí jsme aplikovali graficko-početní metodu. V grafu 9.1 je znázorněna tahová charakteristika elektromagnetu spolu s odporem pružinových mechanismů. Zdvih kontaktů jsme rozdělili na 15 úseků. Pro každý úsek v tabulce 9.3 jsme vypočetli střední přebytek síly, vykonanou práci na konci každého úseku, rychlost na konci úseku, střední rychlost, dobu průchodu úsekem a celkovou dobu zapnutí.

Tabulka 9.3 Tabulka pro výpočet zapínací rychlosti

Úsek č.	F_x [N]	W_x [Nm]	v_x [m/s]	v_{sx} [m/s]	t_x [s]	t_n [s]
1	21,75	0,02	0,316	0,158	0,00591	5,910E-03
2	23,68	0,042	0,458	0,387	0,00241	8,320E-03
3	26,61	0,067	0,579	0,519	0,00180	1,012E-02
4	30,54	0,096	0,693	0,636	0,00147	1,159E-02
5	35,47	0,129	0,803	0,748	0,00125	1,284E-02
6	40,4	0,167	0,914	0,859	0,00109	1,393E-02
7	45,33	0,209	1,022	0,968	0,00096	1,489E-02
8	53,26	0,259	1,138	1,08	0,00086	1,575E-02
9	62,19	0,317	1,259	1,199	0,00078	1,653E-02
10	3,75	0,321	1,267	1,263	0,00074	1,727E-02
11	13,75	0,334	1,292	1,28	0,00073	1,800E-02
12	17,2	0,35	1,323	1,308	0,00071	1,871E-02
13	26,9	0,375	1,369	1,346	0,00069	1,940E-02
14	50,6	0,422	1,453	1,411	0,00066	2,006E-02
15	108,5	0,523	1,617	1,535	0,00061	2,067E-02

Příklad výpočtu hodnot z tabulky č. 9.3 pro úsek č.3

Střední tahový přebytek síly

$$F_3 = 38 - 11,39 = 26,61 \text{ N}$$

Vykonána práce na konci úseku

$$W_3 = W_2 + F_3 \cdot l = 0,042 + 26,61 \cdot 0,933 \cdot 10^{-3} = 0,067 \text{ Nm}$$

Rychlost na konci úseku

$$v_3 = \sqrt{5 \cdot W_3} = \sqrt{5 \cdot 0,067} = 0,579 \text{ m/s}$$

Střední rychlost v úseku

$$v_{s3} = \frac{v_3 + v_2}{2} = \frac{0,579 + 0,458}{2} = 0,519 \text{ m/s}$$

Doba, za kterou prochází úsekem

$$t_3 = \frac{l}{v_{s3}} = \frac{0,933 \cdot 10^{-3}}{0,519} = 1,79 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

Doba, která uplyne od počátku po konec úseku

$$t_{1-3} = t_1 + t_2 + t_3 = (5,91 + 2,41 + 1,79) \cdot 10^{-3} = 10,1 \cdot 10^{-3} \text{ s}$$

9.3.2 Rychlost a doba vypínacího pochodu

Tabulka 9.4 Tabulka pro výpočet vypínacího času

Úsek č.	F_x [N]	W_x [Nm]	v_x [m/s]	v_{sx} [m/s]	t_x [s]	t_n [s]
15	123,5	0,115267	0,759	0,3795	2,46E-03	2,460E-03
14	113,4	0,221107	1,051	0,905	1,03E-03	3,490E-03
13	103,1	0,317333	1,26	1,156	8,10E-04	4,300E-03
12	92,8	0,404	1,421	1,341	7,00E-04	5,000E-03
11	82,25	0,481	1,551	1,486	6,30E-04	5,630E-03
10	11,88	0,492	1,568	1,56	6,00E-04	6,230E-03
9	11,81	0,503	1,586	1,577	5,90E-04	6,820E-03
8	11,74	0,514	1,603	1,595	5,90E-04	7,410E-03
7	11,67	0,525	1,62	1,612	5,80E-04	7,990E-03
6	11,6	0,536	1,637	1,629	5,70E-04	8,560E-03
5	11,53	0,547	1,654	1,646	5,70E-04	9,130E-03
4	11,46	0,558	1,67	1,662	5,60E-04	9,690E-03
3	11,39	0,569	1,687	1,679	5,60E-04	1,025E-02
2	11,32	0,58	1,703	1,695	5,50E-04	1,080E-02
1	11,25	0,591	1,719	1,711	5,50E-04	1,135E-02

Výsledné hodnoty z tabulky 9.4 vychází z nejnepříznivější polohy stykače, která je v tomto případě vodorovná. Postup výpočtu je totožný jako pro zapínání pochodu stykače jen s rozdílem, že působící síly pružiny jsou kontaktní a vypínací. Doby vypínání se budou lišit, bude-li stykač umístěn v jiné poloze. Teoreticky by se měl čas zkrátit, protože časy vypínání uvedené v tabulce 9.4 jsou nejdelší možné.

10 Zhodnocení výsledku

Hlavním zadáním této diplomové práce bylo provést návrh stykače nízkého napětí dle zadaných parametrů.

Izolační návrh stykače vychází z tabulky, která stanovuje minimální povrchové cesty a vzdušné vzdálenosti. Z bezpečnostních důvodů je provedeno nepatrné zvětšení těchto hodnot, proto se dá izolační návrh považovat za lehce předimenzovaný.

Další část návrhu se zabývá návrhem samotné proudovodné dráhy stykače. Zvolením proudové hustoty jsme vypočetli minimální dovolený průřez proudovodné dráhy a kontaktního můstku. Vypočetli jsme provozní mez stykového odporu a odpor na mezi svaření kontaktů, z čehož jsme stanovili minimální přitlačnou sílu, působící na kontaktní můstek. Vlivem procházejícího proudu jsme stanovili působící elektrodynamické síly. Na základě působení těchto sil jsme navrhli pružinu kontaktního můstku.

Provedli jsme kontrolu působení tepelných účinků elektrického proudu. Jmenovité oteplení proudovodné dráhy vyhovuje. Při výpočtu krátkodobého oteplení jsme zjistili, že krátkodobé oteplení stykače je limitováno a to tak, že procházející proud nesmí přesáhnout 1800 A. Je třeba podotknout, že výpočtem oteplení proudovodné dráhy stykače se můžeme pouze přiblížit reálným hodnotám oteplení. V praxi se na základě výpočtu návrhu stykače zhotoví prototyp, který je následně podroben zkouškám ve zkušebně.

V neposlední řadě jsme provedli návrh zapínacího a vypínacího mechanismu. Zapínací mechanismus je tvořen jednofázovým elektromagnetem. Elektromagnet je navržen tak, aby při zapínání překonal odporovou sílu kontaktních a vypínacích pružin. Střední oteplení cívky elektromagnetu je vyhovující pro použitou třídu izolace. Jelikož se jednalo o jednofázový elektromagnet musel se k odstranění nechtěného bzučení a chvění kotvy navrhnout vhodný závit nakrátko, který tyto negativní jevy minimalizuje. Vypínací mechanismus je tvořen dvěma pružinami, které se uvedou v pohyb při vypnutí elektromagnetu. Jako poslední jsme vypočetli dynamiku stykače, kde se stanovily časy a rychlosti zapínacího a vypínacího mechanismu stykače.

Literatura

- [1] NOVOTNÝ, Vladimír. *Elektrické přístroje*. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 203 s. ISBN 80-01-02306-0.
- [2] ČSN EN 60 947-1 ed.4 *Spínací a řídicí přístroje nízkého napětí – Část 1: Všeobecná ustanovení*. Praha: Český normalizační institut 2008 str:200
- [3] MRAVENEC, Rudolf. *Elektrické stroje a přístroje. II. Elektrické přístroje*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury 1979 str:260
- [4] HAVELKA, Otto. *Stavba elektrických přístrojů I*. Brno: Vydavatelství VUT, 1984. str:262
- [5] HAVELKA, Otto. a kolektiv *Elektrické přístroje* Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury 1985
- [6] HAVELKA, Otto, Zdeněk VÁVRA a Dalibor SVOBODA. *Podklady a příklady pro navrhování elektrických přístrojů I*. Brno: Editační středisko VUT, 1985.
- [7] HALLIDSY D., RESNICK R., a WALKER J. *Fyzika – Část 3 Elektřina a magnetismus*. Brno: vysoké učení technické – nakladatelství VUTIAM a PROMETHEUS Praha, 1997 ISBN 80-214-1868-0